



2019-2020



MASTER AETPF

Agrosciences, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt

Parcours GCRE

Gestion Conservatoire et Restauration des Ecosystèmes

Étude du brochet (*Esox lucius*) et de ses frayères sur la Seine



Marion GRIMAUD

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 15/09/2020

Enseignant référent : Sandrine CHAUCHARD, responsable du parcours GCRE

Tuteur de stage : Maxime LESIMPLE, chargé de mission Milieu Aquatique

Structure d'accueil : Fédération de Seine-et-Marne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, 77950 MONTEREAU SUR LE JARD



Table des matières

Remerciements	i
Présentation de la structure d'accueil	i
1 Introduction	1
2 Matériel et Méthode.....	3
2.1 Zone d'étude.....	3
2.2 Radiopistage	4
2.2.1 Marquage des brochets	4
2.2.1.1 Marque active	5
2.2.1.2 Marque visuelle.....	5
2.2.2 Suivi des brochets.....	5
2.2.2.1 Suivi mobile	5
2.2.2.2 Postes fixes.....	6
2.3 Suivi des frayères de Jaulnes et Villiers	6
2.4 Données abiotiques	7
2.5 Traitement des données.....	7
3 Résultats.....	9
3.1 Étude de la migration holobiotique des brochets.....	9
3.1.1 Effort de recherche	9
3.1.2 Les déplacements des brochets	9
3.1.3 Domaine vital des brochets.....	13
3.2 Suivi des frayères de Jaulnes et de Villiers-Sur-Seine.....	14
3.2.1 Données biologiques	14
3.2.1.1 Diversité piscicole	14
3.2.1.2 Population de brochets.....	15
3.2.1.3 Productivité des frayères	16
3.2.2 Données abiotiques.....	17
3.2.2.1 Hauteur et température de l'eau.....	17
3.2.2.2 Période favorable à la reproduction du brochet	17
3.2.3 Préconisation des mesures de gestion.....	19
4 Discussion.....	19
4.1 Migration holobiotique des brochets.....	19

4.2	Domaine vital.....	21
4.3	Suivi des frayères de Jaulnes et de Villiers	22
5	Conclusion.....	23
	Bibliographie	24
	Résumé.....	26
	Abstract	26
	Annexe I.....	I
	Annexe II.....	II
	Annexe III.....	III
	Annexe IV.....	IV
	Annexe V.....	IV
	Annexe VI.....	V
	Annexe VII	VI
	Annexe VIII	VI
	Annexe IX.....	VII
	Annexe X.....	VII
	Annexe XI.....	VIII
	Annexe XII.....	IX
	Annexe XIII.....	IX
	Annexe XIV	X
	Annexe XV	XII
	Annexe XVI	XIII
	Annexe XVII	XIII

Remerciements

Cette étude sur le brochet et ses frayères menée par la Fédération de Seine-et-Marne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique a été financée par la contribution de l'Agence de l'Eau Seine Normandie, la Fédération Nationale de la Pêche en France, l'Union de Bassin Seine Normandie ainsi que celle du Crédit Agricole.

Je tiens dans un premier temps à remercier M. Philippe GAVELLE, président de la fédération, et M. Thierry MORET, directeur de la Fédération, pour m'avoir accueilli au sein de leur structure et permis de réaliser ce stage.

Un grand merci à M. Maxime LESIMPLE, mon maître de stage qui m'a accompagné tout au long de cette étude. Merci pour ta confiance, ta disponibilité et tes conseils dans la réalisation de cette étude. J'ai beaucoup appris en travaillant à tes côtés et cela n'a fait que développer mon intérêt pour les milieux aquatiques.

Je remercie également les autres membres de l'équipe de la fédération pour leur sympathie et bonne humeur. Merci en particulier à Rémi VILLALTA, pour m'avoir apporté tes connaissances sur le terrain et pour tes conseils, Aristide FLON pour avoir été mon pilote de bateau pendant la période de confinement et Michaël BRUHAIS pour m'avoir accompagné sur le terrain pendant des sorties de suivi.

Merci à Mme Sandrine CHAUCHARD, mon enseignante référente, pour son implication dans le déroulé de ce stage et pour avoir été à l'écoute de mes questions.

Enfin, je remercie ma famille pour son soutien pendant toute la durée de ce stage.

Présentation de la structure d'accueil

La Fédération de Seine-et-Marne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (FDAAPPMA 77) est une association à but non lucratif de loi 1901 qui a été créée en 1927. Chargée de missions d'intérêt général, elle a le caractère d'établissement d'utilité publique et regroupe les 43 Associations Agréées pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (AAPPMA) qui sont réparties sur l'ensemble du département.

Les missions de la FDAAPPMA 77 sont multiples et s'articulent principalement autour du développement du loisir pêche sur le département, de la sensibilisation et de l'éducation sur les milieux aquatiques et le patrimoine piscicole. Elle mène également des actions visant à mieux connaître et à protéger les milieux aquatiques du département.

1 Introduction

Le fleuve Seine s'étend sur une longueur de 771 km à travers la France. Il prend sa source dans la commune de Source-Seine en Côte d'Or à une altitude de 416m et se jette en mer de la Manche, au Havre en Seine Maritime. Dans le département de Seine-et-Marne, le fleuve représente un linéaire de 100 km.

D'après le Plan Départemental pour la Protection du milieu aquatique et la Gestion des ressources piscicoles de Seine-et-Marne (PDPG77) (FDAAPPMA 77, 2015), la Seine est qualifiée de contexte cyprinicole (Figure 1) avec pour espèce repère le brochet *Esox lucius*. Le brochet est un carnassier avec un milieu de vie très vaste qui s'étend du lit mineur, qui constitue son lieu de vie habituel, jusqu'au lit majeur, dans les zones humides inondables, dans lesquelles il migre pour y frayer. De par ces exigences d'habitat dans les deux milieux, le brochet est une espèce dite « parapluie », c'est-à-dire que lorsque l'on protège l'habitat du brochet, on protège également un grand nombre d'autres espèces aquatiques.

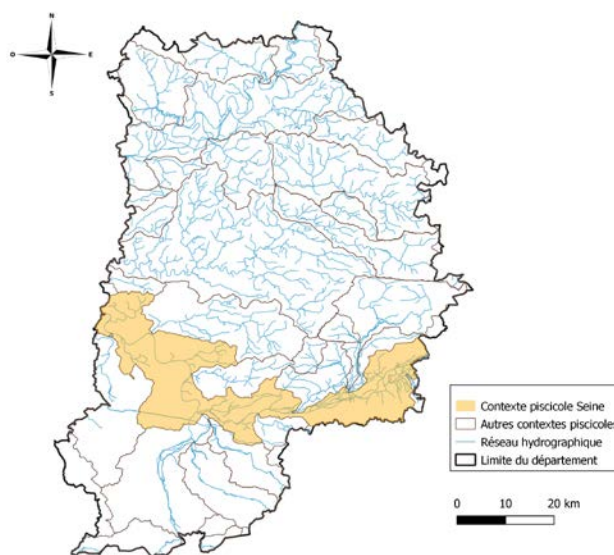


Figure 1 : Carte des contextes piscicoles de Seine-et-Marne. Le contexte cyprinicole Seine est représenté en jaune.

Le contexte Seine subit de fortes pressions qui entraîne la dégradation du milieu aquatique et qui met en danger le maintien des populations de brochets (espèce classée « vulnérable » en France métropolitaine (UICN Comité français, MHNH, SFI & AFB, 2019)). De ce fait, le contexte a été classé comme contexte dégradé par le PDPG 77, car au moins une étape du cycle biologique du brochet (reproduction, éclosion, croissance) ne peut plus se réaliser.

L'un des principaux facteurs de perturbations de la Seine sont les altérations hydromorphologiques liées à sa mise au grand gabarit dans les années 70 (FDAAPPMA 77, 2015). La linéarisation du cours d'eau ainsi que l'artificialisation des berges a conduit à une homogénéité du milieu aquatique privant les espèces aquatiques de lieux de refuge et de reproduction. Ce phénomène a été accentué avec l'augmentation de la navigation qui favorise l'érosion des berges par leur batillage. La navigation entraîne également une augmentation de la turbidité du milieu qui empêche le développement des macrophytes immergées ce qui a un impact sur les populations aquatiques comme le brochet (Jepsen *et al.*, 2001). De plus, le passage fréquent de péniches engendre la dégradation de la qualité de l'eau avec le rejet de substances polluantes telles que les hydrocarbures.

Le deuxième facteur principal de perturbation du contexte Seine est la gestion du régime hydraulique ainsi que les ouvrages hydrauliques présents sur le linéaire. Pour permettre le passage des péniches, la hauteur d'eau de la Seine est gérée artificiellement par les lacs réservoirs de Seine-Grands-Lacs et par huit barrages-écluses qui cloisonnent le fleuve en biefs¹. L'ensemble de ces ouvrages constituent des ruptures de continuités écologiques à la

¹ Section d'un cours d'eau délimitée par deux barrages

fois pour les mouvements des espèces aquatiques, mais aussi pour le transit sédimentaire. Le transport des sédiments dans le cours d'eau est très important dans le maintien des berges, mais aussi pour la diversité des habitats piscicoles. Leur retenue par les barrages empêche leur dépôt à l'aval du linéaire et cela accentue l'érosion des berges (Elosegi & Sabater, 2013). En plus d'être un obstacle pour les sédiments, les barrages constituent des points de blocages pour les déplacements des espèces piscicoles. Pour permettre le contournement des obstacles par ces espèces, certains ouvrages sont équipés de passe à poissons. Cela peut être une bonne alternative pour rétablir partiellement la continuité écologique, mais elles ne sont pas adaptées à toutes les espèces. De plus, les passes à poissons ne permettent pas le passage des sédiments. D'autres méthodes peuvent aussi être utilisées par les poissons pour contourner les barrages comme l'utilisation d'annexes hydrauliques. Ce comportement a été observé chez le brochet par la FDAAPPMA 59 (2013) où des individus ont emprunté des ruisseaux à proximité du cours d'eau principal pour contourner une écluse. Mais la meilleure méthode pour restaurer les continuités écologiques d'un cours d'eau reste l'effacement des ouvrages. Cependant, cette méthode doit correspondre aux usages du cours d'eau pour pouvoir être appliquée.

L'ensemble des altérations hydrauliques et hydromorphologiques du fleuve ont pour conséquences la réduction de l'inondabilité des zones humides situées à proximité ainsi que la perte de connexion avec la Seine. En effet, la gestion artificielle du débit des cours d'eau change le régime de crues qui sont moins fréquentes, mais de plus grande intensité. Cela impacte le fonctionnement des zones humides et entraîne des changements dans la composition du couvert végétal ainsi qu'une diminution de la diversité des espèces végétales (Farell *et al.*, 2009 ; Hupp *et al.*, 2009 ; Kingsford, 2009). Toutes ces modifications ont un effet négatif sur la faune en général et notamment sur les populations piscicoles.

Le brochet est une espèce qui est particulièrement impactée par la dégradation des zones humides. Le carnassier est un migrateur holobiotique² qui migre dans les zones inondables pendant sa période de reproduction, ces zones sont alors appelées « frayères » (Figure 2). Le brochet dépose ses œufs sur la végétation immergée présente dans les frayères dès que la température de l'eau se situe entre 6°C et 14°C et que la hauteur d'eau est de 20 cm minimum. La stabilité de ces paramètres ainsi que le substrat de ponte sont déterminants dans le succès de reproduction du brochet. Ces conditions doivent être observées pendant un minimum de 40 jours pour que la frayère soit fonctionnelle à la reproduction (Chancerel, 2003). D'autres paramètres peuvent aussi avoir une influence sur la productivité des frayères comme la transparence de l'eau, le pH ou la teneur en oxygène (Chancerel, 2003). Le bon fonctionnement des zones humides est donc très important pour la survie des populations de brochets.

² Espèces effectuant leur cycle vital en migrant exclusivement en eaux douces

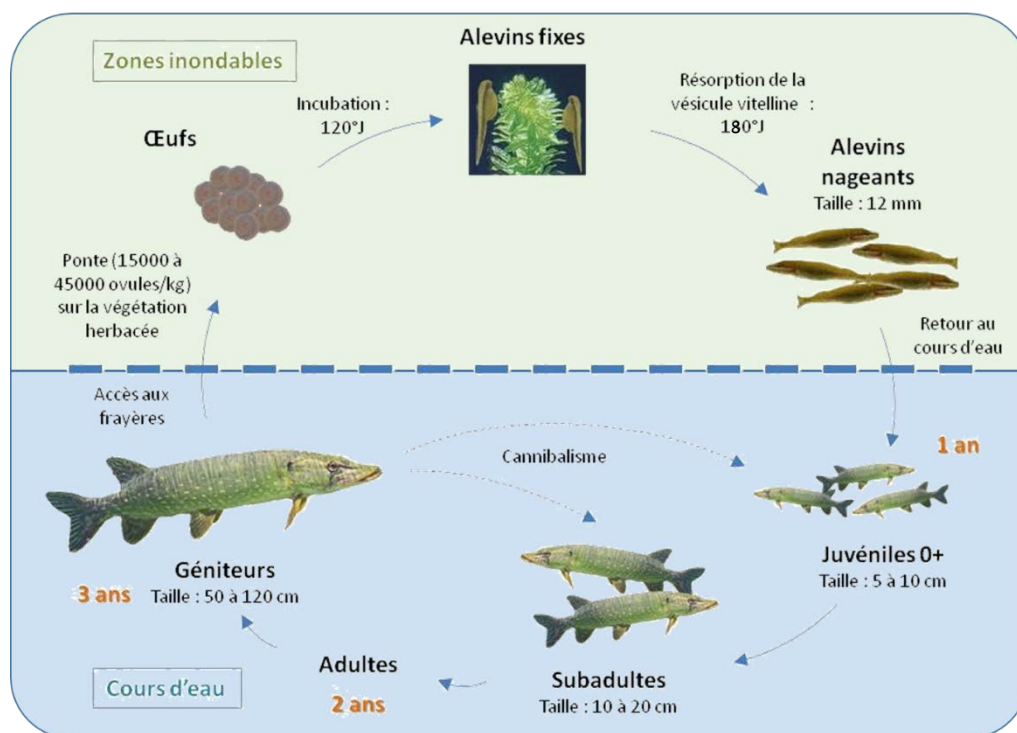


Figure 2 : Cycle de vie du brochet. ©PDPG 77, modifié d'après Chancerel (2003)

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux déplacements des brochets sur la Seine ainsi qu'à la fonctionnalité de deux frayères restaurées. Le but étant d'évaluer les impacts des activités anthropiques sur la continuité écologique de la Seine ainsi que sur la qualité des habitats piscicoles et des zones humides. Pour cela, nous avons sélectionné une zone d'étude qui se trouve dans la plaine de la Bassée en Seine-et-Marne. La Bassée est la plus vaste zone humide d'Ile-de-France qui a été classée comme zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF). Malheureusement, elle est soumise à de nombreuses pressions. Cette plaine inondable est fortement altérée par les extractions de granulats, très nombreuses dans le secteur, ainsi que par les cultures céréalières intensives qui drainent le sol (Picourlat *et al.*, 2018). À cela s'ajoutent les impacts liés à la modification hydromorphologique de la Seine qui la traverse. L'objectif final de la présente étude sera de prioriser les actions de restaurations des zones humides et des habitats piscicoles en lien avec les continuités écologiques.

2 Matériel et Méthode

Les paragraphes suivants présentent la zone d'étude, la méthode de radiopistage, le suivi des frayères, le suivi des données abiotiques et les analyses réalisées pour répondre aux objectifs présentés précédemment.

2.1 Zone d'étude

La zone d'étude se trouve dans la plaine de la Bassée. Elle comprend la Seine et ses annexes et s'étend du pont de Bray-sur-Seine (limite aval) jusqu'à Villiers sur Seine (Figure 3), à la limite départementale entre la Seine-et-Marne et l'Aube. Cela représente un linéaire de 23,6 km du cours d'eau principal. La zone est découpée en trois biefs : le bief de la Grande Bosse à l'aval du barrage de Jaulnes, le bief de Jaulnes et le bief du Vezoult à l'amont.

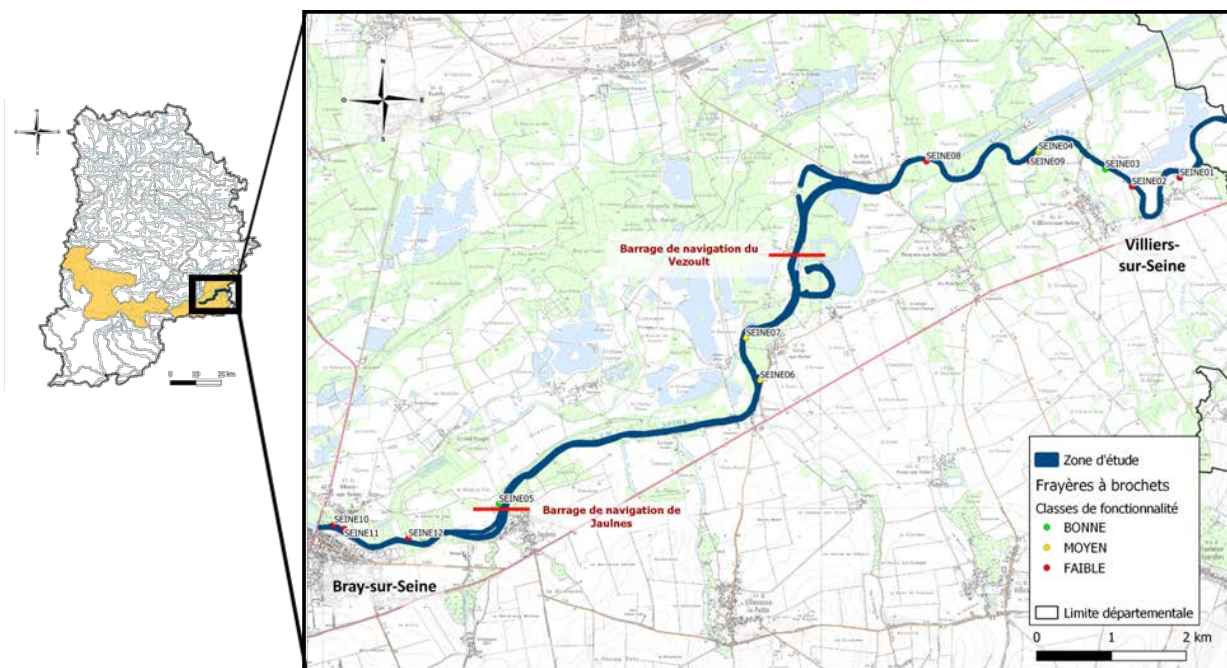


Figure 3 : Localisation de la zone d'étude.

La zone étudiée est caractérisée par deux niveaux d'anthropisation. Les biefs de la Grande Bosse et de Jaulnes sont des axes navigables de la Seine. Mais seule la partie aval du bief du Vezoult est navigable. Il est ensuite dévié par le canal de dérivation de Beaulieu laissant la partie amont du bief sans trafic fluvial.

Les frayères présentes sur la Seine dans le département de Seine-et-Marne ont été inventoriées par la FDAAPPMA 77 en 2016. Douze frayères ont été répertoriées au sein de la zone d'étude (Figure 3), dont deux classées en bon état fonctionnel pour la reproduction des brochets (HOUEIX et al., 2017). Ces deux frayères sont situées au niveau du barrage de Jaulnes et de la ville de Villiers-sur-Seine. Elles ont fait l'objet de travaux de restauration entre 2017 et 2018 consistant principalement à l'ouverture du milieu. Parmi les autres frayères inventoriées dans la zone, trois ont une fonctionnalité « moyenne » et sept ont une fonctionnalité qualifiée de mauvaise. Dans le cadre de cette étude, un suivi sera effectué dans les frayères avec une fonctionnalité bonne et moyenne.

2.2 Radiopistage

Dans les paragraphes suivants sont présentées les méthodes de marquage et de suivi utilisées pour suivre le déplacement des brochets.

2.2.1 Marquage des brochets

Le marquage des brochets s'est déroulé lors de quatre journées en septembre et octobre 2019. Les brochets marqués ont été capturés en Seine par la FDAAPPMA 77, 62 et 89 à l'aide d'un bateau d'échantillonnage en grands milieux (Annexe I). Au total, 24 brochets ont pu être marqués (Annexe II). Ils ont tous été remis à l'eau dans le bief dans lequel ils avaient été prélevés excepté pour les individus 22, 82, 98, 116, 175 et 197 qui ont été capturés dans le bief de Jaulnes puis relâchés dans le bief de la Grande Bosse, à l'aval du barrage de Jaulnes. Lors de ces journées, 9 silures ont également été marqués dans l'optique d'une étude future

sur cette espèce. Les individus capturés ont été équipés de deux types de marques différents : une marque active et une marque visuelle (Annexe I).

2.2.1.1 *Marque active*

Les marques actives utilisées sont des émetteurs à antenne externe du fabricant canadien Sigma Eight®. Les émetteurs mesurent 12mm de diamètre et font 4.6 mm de long pour un poids de 8,5g (Annexe I). L'antenne externe a une longueur comprise entre 27,6cm et 31,5 cm. Pour limiter la gêne que peut occasionner la présence de l'émetteur dans le corps du brochet, le ratio poids de la marque/poids du brochet ne doit pas excéder 2% (Jepsen *et al.*, 2002). Le poisson marqué doit donc peser plus de 425g ce qui revient à marquer des brochets de plus de 50cm.

Les émetteurs sont implantés dans la cavité péritonéale des brochets par intervention chirurgicale. La chirurgie nécessite le suivi d'un protocole normalisé et doit être réalisé par un opérateur habilité par l'école vétérinaire de Nantes (ONIRIS) pour la conception de protocoles expérimentaux et les interventions chirurgicales sur les poissons. Les opérations ont été réalisées par l'Union de Bassin. Le taux de survie postopératoire est de 100%. Chaque émetteur implanté a préalablement été paramétré pour émettre un signal radio toutes les 3 secondes. Le signal passe à 10 secondes si l'individu marqué est resté immobile plus de 24h. Les émetteurs émettent à une fréquence de 149,800 MHz pour certains et 149,780 MHz pour d'autres. Des codes d'identification ont été choisis pour chacun des émetteurs. Ce code permet ensuite de reconnaître les brochets marqués lors du suivi sur le terrain. La durée de vie des émetteurs est d'environ 2 ans.

Chaque individu a été sexé pendant l'intervention chirurgicale par observation des gonades. Les brochets ont tous été mesurés et pesés. Des écailles ont également été prélevées pour ensuite estimer leur âge par une analyse scalimétrique. De plus, toutes les marques, lésions ou blessures éventuellement présentes sur leur corps ont été relevées pendant le marquage.

2.2.1.2 *Marque visuelle*

Les marques visuelles utilisées sont des marques dites « spaghetti » qui sont fixées à l'arrière de la nageoire dorsale des brochets (Annexe I). Cette phase a également été réalisée par l'Union de Bassin. Chaque marque spaghetti est dotée d'un numéro d'identification. Ainsi, dans le cas où un pêcheur viendrait à capturer un brochet, il sera informé qu'il s'agit d'un brochet marqué faisant partie de l'étude. Une campagne de sensibilisation a eu lieu en même temps que l'étude afin que les pêcheurs soient en capacité de transmettre les informations sur le lieu de capture et de la remise à l'eau (Annexe III).

2.2.2 *Suivi des brochets*

Deux protocoles de suivis ont été mis en œuvre : un suivi mobile et un suivi fixe.

2.2.2.1 *Suivi mobile*

Le suivi mobile a été réalisé sur la Seine et ses annexes entre octobre 2019 et juin 2020. Un récepteur Sigma Eight® branché sur batterie était placé dans un sac à dos de façon à ce qu'il soit facilement transportable sur le terrain. Le récepteur était relié à une antenne de type YAGI (Annexe IV) qui permettait de détecter un signal avec une portée de quelques dizaines de

mètres quand les conditions étaient idéales. Les signaux reçus par le récepteur étaient directement visibles sur smartphone *via* l'application Orion Listener®. Plusieurs informations y figurent telles que la fréquence d'émissions, le type de signal reçu (3sec ou 10 sec), le code de l'émetteur et la puissance maximale à laquelle ce dernier est détecté (Annexe V). Lorsqu'un brochet est détecté, son code s'affichait plusieurs fois à la suite sur l'application. L'heure de détection et la localisation de la détection étaient alors notées sur une carte papier du linéaire prospecté. Les données étaient également enregistrées sur une carte SD dans le récepteur puis elles étaient extraites sur ordinateurs pour être traitées.

Le suivi mobile s'est effectué à pied ou en bateau en longeant les berges. Seulement quatre sorties ont été réalisées entre le mois d'octobre et de décembre. Le nombre de suivis par semaine a augmenté à partir du mois de janvier au moment de la période théorique de migration du brochet. La fréquence de sorties était alors de 3 à 5 fois par semaine en janvier et de 2 à 3 fois par semaine pendant le mois de février. Malheureusement, le suivi mobile a été suspendu pendant les mois de mars dus à la crise sanitaire du covid-19. Le radiopistage a pu reprendre à partir du mois d'avril et s'est poursuivi jusqu'en juin avec un minimum de deux suivis par semaine.

2.2.2.2 Postes fixes

En addition au poste mobile, trois postes fixes ont été placés dans des lieux stratégiques pour le suivi des déplacements de brochets (Annexe VI). Un poste fixe à une antenne a été placé à l'entrée de la frayère de Jaulnes (SEINE05 / Récepteur radio 3) pour vérifier si elle a été occupée par des brochets. Un deuxième poste fixe à deux antennes a été installé au niveau de la passe à poissons de Jaulnes (Récepteur radio 1 et 2) pour étudier le passage du brochet dans la passe lors de sa migration. Enfin, un troisième poste fixe à une antenne a été installé à l'entrée du canal de Beaulieu (Récepteur radio 4) pour savoir si certains individus marqués sortaient de la zone d'étude en empruntant le canal.

Les postes fixes sont composés d'un récepteur Orion à une ou deux antennes YAGI de Sigma Eight®. Les données sont enregistrées en continu sur une carte SD et sont ensuite exportées *via* le logiciel Orion Tool® sur un ordinateur portable. Les données sont au même format que celles lues sur l'application Orion Listener® lors du suivi mobile. Les récepteurs fixes ont été installés en août 2019 et retirés début juillet 2020. Les enregistrements ont été interrompus mi-février sur le site de Jaulnes à cause d'une coupure de courant.

2.3 Suivi des frayères de Jaulnes et Villiers

Les frayères de Jaulnes et Villiers ont fait l'objet de travaux de restauration au cours des hivers 2017 et 2018 qui ont consisté principalement en l'ouverture du milieu.

La frayère de Jaulnes est une frayère artificielle gérée par les voies navigables de France (VNF). Son ouverture est contrôlée par un système de vannes qui maintient la frayère en eau au printemps pour permettre aux alevins de se développer.

Afin d'attester de la reproduction de l'année, une pêche électrique a été réalisée dans chacune des frayères. Le matériel utilisé est du type « Martin pêcheur » de la marque Dream Electronique®, à une anode et une épuisette. La pêche électrique est basée sur le principe de la « galvanotaxie », c'est-à-dire la « nage forcée » du poisson dans le courant électrique. Un champ électrique orienté (positif et négatif) est généré dans la frayère et le poisson, pris dans

ce champ, est attiré vers le pôle positif (l'anode) manipulé par l'opérateur. Un deuxième opérateur récupère ensuite le poisson à l'épuisette.

La technique d'échantillonnage utilisée est la pêche par points à pieds. Cela consiste à réaliser des points de pêche tous les 4m en privilégiant les habitats favorables à la présence de l'espèce. Un point de pêche correspond à un déplacement de l'anode, sans que l'opérateur ne se déplace, dans un cercle de 1m de diamètre pendant 30 secondes. La pêche est arrêtée lorsque des juvéniles sont capturés.

Chaque poisson capturé a été mesuré, pesé et leur espèce a été déterminée.

2.4 Données abiotiques

Un suivi thermique a été réalisé sur la Seine à l'aide de cinq sondes de la marque HOBO® installées sur la zone d'étude (Annexe VII). Trois sondes ont été placées dans les bras morts de la Seine et une sonde a été placée dans chaque bief (Jaulnes et Vezoult).

La température de l'eau a également été suivie dans les frayères de Jaulnes et de Villiers grâce à un enregistreur HOB00341. Cette sonde mesure la température de l'eau toutes les heures ainsi que la pression de l'eau. En addition à la sonde, des mires ont été placées dans les frayères et le niveau d'eau a été relevé une vingtaine de fois pendant les sorties de suivi. À partir des hauteurs d'eau relevées sur les mires et les pressions enregistrées par la sonde, une droite de régression a été construite sur R.

L'équation de la droite (hauteur d'eau=0,009069*pression - 910) a ensuite permis de déterminer les hauteurs d'eau pour tous les jours de suivi (Annexe X).

Les valeurs de débits de la Seine ont également été relevées. Les données utilisées sont celles enregistrées au niveau de la station de Bazouche-les-Bray située à l'aval de la zone d'étude. Elles ont été extraites du site de la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) pour les plus anciennes et du site de Vigicrues (<https://www.vigicrues.gouv.fr/>).

2.5 Traitement des données

Dans l'objectif d'étudier la migration des brochets, il était nécessaire de calculer les distances parcourues par chacun des individus. Pour ce faire, des points kilométriques (pk) ont été créés tous les 100 m sous QGIS sur l'ensemble du linéaire de la zone d'étude. Les points débutent dans la ville de Nogent-sur-Seine, à l'amont de la zone et se poursuivent jusqu'au point 49,1 km au niveau de l'écluse de la Grande Bosse, à l'aval de la zone. Pour chaque détection de brochet, un point a été créé sous SIG en reportant les points localisés sur la carte papier utilisée sur le terrain. Pour chaque point de détection, le pk le plus proche lui a été associé. Ainsi, les distances minimales parcourues par chaque individu entre deux détections ont pu être calculées en faisant la différence des pk de chaque point.

$$d (2 \text{ détections}) = |pk_{dét(t)} - pk_{dét(t-1)}| \text{ (km)}$$

Avec d : distance

pk_{dét(t)} : point kilométrique de la détection d'un individu à un instant t

pk_{dét(t-1)} : point kilométrique de la détection d'un individu à l'instant t-1

On précise ici que la distance parcourue calculée est minimale, car il s'agit de la distance connue qui sépare deux positions à un instant t . Or, un individu peut réaliser plusieurs déplacements dans une journée.

Le calcul des distances parcourues par chaque individu ne permet pas de comparer les brochets entre eux, car les échelles de temps entre deux détections varient d'un individu à l'autre, les données ne sont donc pas uniformisées. C'est pour cela que nous avons calculé des valeurs moyennes de distances minimales parcourues par jour que l'on appellera MDD (Minimum average Daily Distance Moved) dans le but d'obtenir des valeurs de même unité. Cette méthode d'analyse est inspirée de celle utilisée par Pauwels *et al.* dans une étude sur les mouvements des brochets d'une rivière en Belgique. Les MDD ont été calculés d'après la formule suivante :

$$MDD_{2\text{ dét}} = \frac{d(2\text{ détections})}{\text{nb de jours entre 2 détections}} \text{ (km/j)}$$

$$MDD_{\text{totale}} = \frac{\sum d(2\text{ détections})}{\text{nb de jours entre 1ère et dernière détection}} \text{ (km/j)}$$

L'analyse des déplacements des brochets a été réalisée avec les données des individus qui ont été redéteints au moins deux fois après leur remise à l'eau. La distance parcourue entre le point de remise à l'eau et la première détection n'a pas été prise en compte. Ce choix repose sur le fait qu'il y a une part d'inconnu trop importante sur les déplacements des brochets pendant la période séparant leur remise à l'eau et leur première détection, ces dernières ayant principalement eu lieu en janvier.

Une fois que les MDD ont été calculées pour tous les individus, des analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R Studio® pour déterminer les variables qui vont avoir une influence sur les déplacements des brochets. Pour cela, des tests de corrélations ont été réalisés ainsi que des comparaisons de moyennes avec des tests de Wilcoxon-Mann-Whitney et des tests de Kruskal Wallis. La condition de normalité des données a été testée par le test de Shapiro avant chaque analyse et elle s'est avérée nulle dans chaque cas. Cela justifie l'utilisation de tests non paramétriques dans les analyses.

En plus des MDD, le domaine vital (DV) des individus a été calculé. Cela correspond à la distance entre le point le plus à l'aval et le point le plus à l'amont pour lesquels le brochet a été détecté. Les DV ont été calculés d'après la formule suivante :

$$DV_{\text{ind}} = pk_{\text{max}} - pk_{\text{min}} \text{ (km)}$$

La surface des domaines vitaux des individus a ensuite été comparée entre la période de reproduction des brochets et la période post-reproduction en utilisant le test de Wilcoxon-Mann-Whitney. D'autres analyses ont également été effectuées pour déterminer les variables qui ont une influence sur la taille de leur espace vital en utilisant les mêmes tests évoqués précédemment. Enfin la taille du domaine vital des brochets a été comparée entre les individus présents dans le bief du Vezoult et ceux présents dans le bief de Jaulnes.

Pour montrer quelles sont les conditions de débit et de température pour lesquelles les brochets se déplacent le plus, une Analyse Factorielle Multiple (AFM) a été réalisée. L'avantage de cette analyse est qu'elle nous montre à la fois les différences entre les individus et les variables, mais elle nous renseigne également sur le lien entre les deux groupes de

variables qui sont ici le débit et la température. L'AFM a été réalisée à partir des MDD calculées pour chacun des individus. La température utilisée correspond à la moyenne des températures des stations d'Athis et du bief de Jaulnes enregistrées entre le 29 décembre 2019 et le 15 juin 2020. Les températures de ces deux stations sont similaires (*wilcox.test* : *p-value* = 0,9711) et elles correspondent à la température de la Seine dans les deux biefs où ont été suivis les brochets. La moyenne des températures de la Seine et des débits a été calculée entre chaque détection et une classe a ensuite été associée à chacune des valeurs de température et de débit. À la suite de cela, un MDD moyen a été calculé pour chaque classe à l'aide d'un tableau croisé dynamique.

Le choix des classes de température s'est fait à partir de valeurs importantes dans le cycle de vie du brochet et que l'on peut trouver dans la littérature. Les valeurs choisies dans l'analyse sont issues du livre de Chancerel (2003) et découlent de valeurs théoriques favorables à la migration et à la reproduction des brochets qui sont entre 6 et 14°C. Ainsi trois classes ont été définies : 0°C-6°C, 7-14°C et >15°C.

Les classes de débits ont quant à elles été déterminées selon les données disponibles dans le but de limiter le nombre de valeurs manquantes. Ainsi le choix s'est arrêté sur des classes avec un pas de 50 m³/s.

3 Résultats

3.1 Étude de la migration holobiotique des brochets

3.1.1 Effort de recherche

Au total, 54 prospections ont eu lieu sur la zone d'étude avec un effort particulier sur les biefs de Jaulnes et du Vezoult. Quelques suivis ont également été menés à l'aval du barrage de Jaulnes, à l'amont de la zone dans le département de l'Aube ainsi que dans quelques annexes telles que la noue de Jaulnes et la Vieille Seine (Annexe VIII). Des individus ont été détectés sur 74% des sorties, ce qui représente un total de 210 détections.

Au cours du suivi par radiopistage, 17 brochets sur les 24 marqués ont été redétectés dont 14 individus qui ont été détectés plus de deux fois après leur remise à l'eau. Les déplacements des 17 brochets ont été représentés graphiquement (Figure 4), mais seules les données des 14 brochets détectés à plus de deux reprises ont été utilisées dans les analyses statistiques.

3.1.2 Les déplacements des brochets

L'ensemble des déplacements effectués par les brochets marqués ont pu être représentés graphiquement sur la figure ci-dessous (Figure 4) à partir des points kilométriques (pk) près desquels les brochets ont été détectés.

La première chose que l'on remarque sur ce graphique est que les déplacements des brochets semblent assez hétérogènes d'un individu à l'autre. En effet, certains individus vont très peu se déplacer et rester dans une zone réduite alors qu'au contraire, certains poissons vont bouger sur de plus grandes distances. C'est le cas notamment du brochet 212 qui a voyagé jusque dans le département de l'Aube et qui a été capturé par un pêcheur à Nogent-sur-Seine.

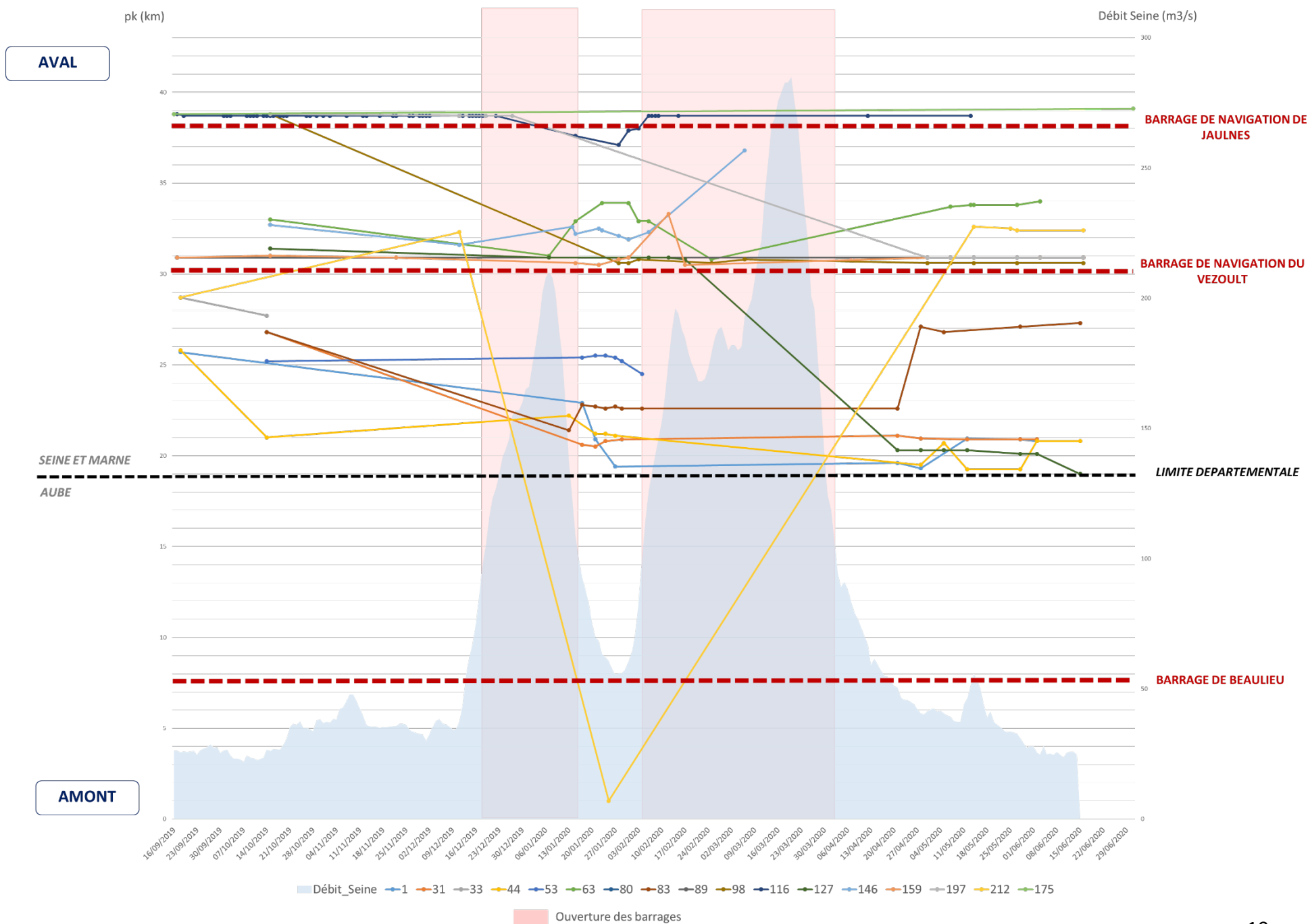


Figure 4 : Graphe représentant l'ensemble des déplacements des brochets suivis par radiopistage dans la zone d'étude. Chaque trait correspond au déplacement d'un individu et chaque point représente une détection. Les obstacles présents sur le linéaire sont symbolisés par les traits en pointillés rouges et la limite départementale entre la Seine-et-Marne et l'Aube est représentée par le trait pointillé noir. Le débit de la Seine est représenté par la courbe pleine en bleu situé en arrière-plan. Les zones délimitées en rouge correspondent aux périodes d'ouverture des barrages quand le débit est supérieur à 100m³/s.

Il est ensuite redescendu dans la zone d'étude, dans le bief de Jaulnes. Au total, le 212 a parcouru plus de 65 km ce qui est bien plus que le brochet 89 qui a parcouru une distance totale minimale de 350 m pendant la durée du suivi. Il est important de noter que les trajets représentés sur la figure 4 sont les déplacements minimaux effectués par les brochets. La fréquence des sorties de suivi n'était pas journalière si bien que des déplacements ont pu avoir lieu entre deux détections sans que l'on puisse le savoir.

Le graphe des déplacements nous montre également que la majorité des individus sont restés dans leur bief d'origine dans lequel ils ont été remis à l'eau pendant le marquage. Cependant, cinq brochets sont parvenus à franchir les barrages qui entrecoupent la zone d'étude : le 212, le 98, le 127, le 197 et le 116. En ce qui concerne les individus 212, 98 et 127, on observe que leurs déplacements correspondent aux périodes de fortes crues. Or, pendant les périodes de forts débits, au-delà des 100 m³/s, les barrages sont ouverts. Cela signifie qu'ils sont recouverts d'eau et ne représentent plus un obstacle à la continuité écologique (Annexe IX). Il est donc fort probable que ces trois brochets aient profité des pics de crues pour passer les barrages d'autant qu'aucun d'eux n'a été détecté par les postes fixes situés au niveau de la frayère et de la passe à poissons de Jaulnes. Pour les individus 116 et 197, plusieurs hypothèses peuvent être émises quant à leur franchissement du barrage de Jaulnes. En effet, le signal de ces deux brochets a été détecté par le poste fixe de la frayère de Jaulnes. Il est donc possible qu'ils aient emprunté la noue de Jaulnes qui longe la frayère pour remonter dans le bief de Jaulnes. Mais cela reste une hypothèse, car un ouvrage bloquant la continuité écologique est présent au niveau de la connexion amont de la noue avec la Seine. Il est également possible qu'ils soient passés par les barrages lorsque ceux-ci étaient ouverts, car leurs déplacements correspondent aux périodes de crues.

À noter qu'aucun des brochets marqués n'a été détecté au niveau de la passe à poissons de Jaulnes, aucun individu ne l'a traversé pour changer de bief.

Enfin d'après ce graphe, les déplacements des brochets semblent être plus importants entre les mois de janvier et avril ce qui correspondrait à leur période de migration.

Les résultats de l'Analyse Factorielle Multiple (AFM) sont représentés sur la figure 5. Ils mettent tout d'abord en évidence, l'hétérogénéité des déplacements effectués par les brochets avec des individus qui se déplacent sur de plus grandes distances (points situés à droite du graphe des individus) que d'autres (points à gauche du graphe des individus). Il semblerait que les mâles aient tendance à se déplacer sur de plus grandes distances comparer aux femelles, mais cette différence observée n'est pas significative (wilcoxon.test ; p-value=0,11 > 0.05). Il n'existe pas non plus de lien entre les MDD et la taille des brochets (*cor.test spearman*: p-value = 0,75, rho = 0,087) ou avec leur âge (*kruskal.test* : p-value = 0.37).

L'AFM montre toutefois des différences de MDD en fonction des valeurs de débit et de température. La majorité des individus se déplacent à des températures comprises entre 6°C et 14°C et à des débits plutôt élevés entre 50 m³/s et 150 m³/s. Deux individus font exceptions : le 83 et le 44 qui se sont déplacés sur de plus grandes distances à des débits faibles inférieurs à 50 m³/s et des températures supérieures à 15°C.

D'après le graphe des groupes, il n'y a pas d'interaction entre la température et le débit. Ces deux variables ne vont pas avoir la même influence sur les mouvements des brochets.

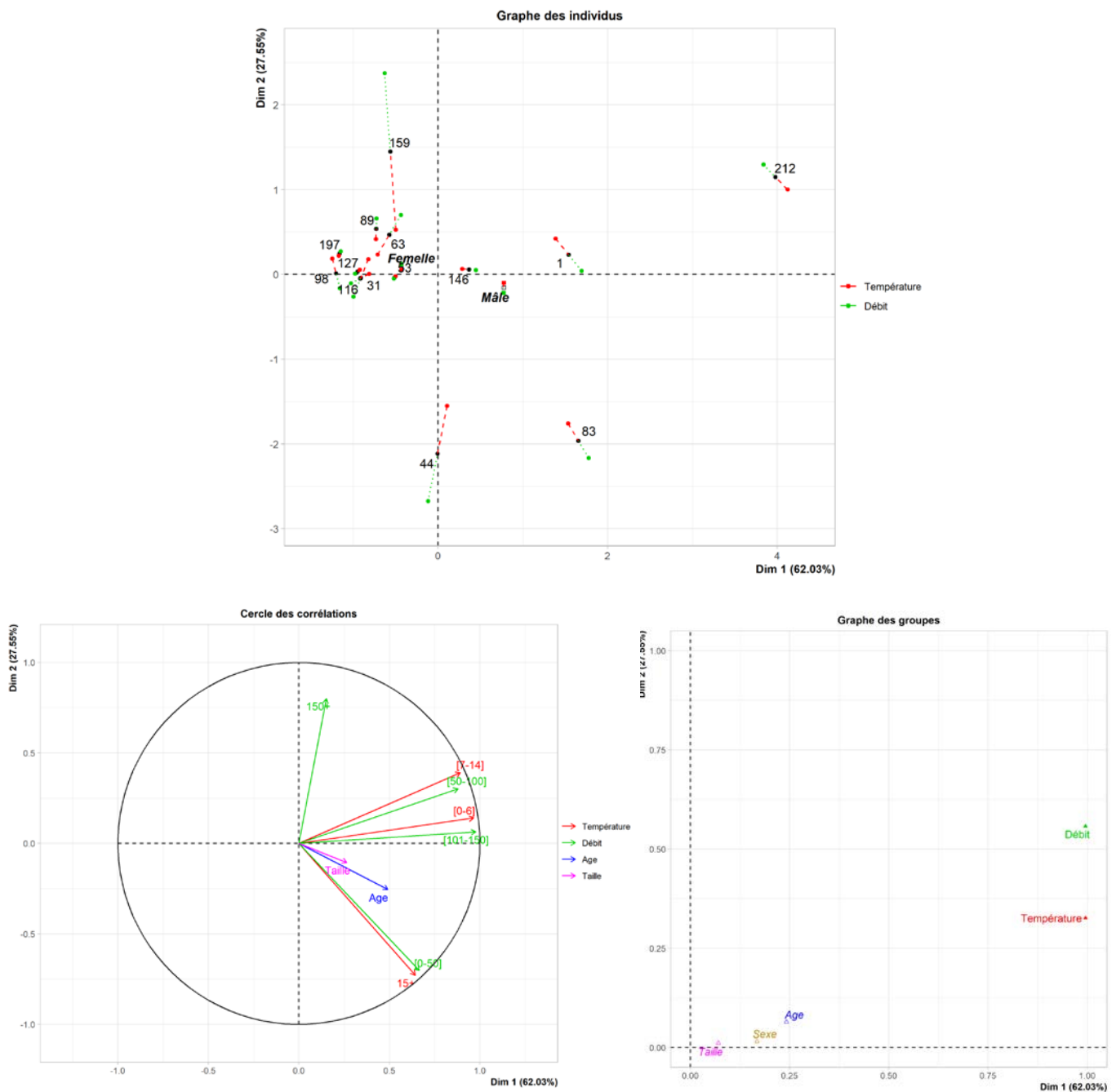


Figure 5 : Analyse Factorielle Multiple (AFM) montrant l'influence des variables « Température », « Débit », « Âge », « Taille » et « Sexe » sur les déplacements des brochets. Le graphe des groupes nous informe aussi sur la liaison entre les groupes de variables « débit » et « température ».

Les résultats obtenus par l'AFM ont ensuite été affinés par des tests de corrélation et de kruskal wallis. En ce qui concerne la relation entre les MDD et la température de la Seine, le test de corrélation démontre que les distances moyennes minimales parcourues par jour par les brochets augmentent quand les températures diminuent (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 0.0008$, $\rho = -0.31$). On observe cependant une séparation entre les distances parcourues à des températures inférieures à 10°C et celles parcourues à des températures de plus de 10°C. En effectuant deux nouveaux tests de corrélation pour ces deux groupes de données, on s'aperçoit que les MDD ont tendance à augmenter lorsque les températures sont en hausse jusqu'à un seuil de 10°C (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 0.13$, $\rho = 0.21$). En revanche, les

brochets se déplacent de moins en moins quand la température est supérieure à 10°C (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 0.14$, $\rho = -0.18$) et leurs déplacements sont pratiquement nuls quand l'eau dépasse les 15°C (*kruskal.test* : $p\text{-value} = 0.0008$; *pairwise.wilcox.test* : $p\text{-value} \ll 0.5$ entre températures <15°C et températures > 15°C).

Il existe une corrélation positive entre les distances moyennes minimales parcourues par jour et le débit de la Seine. Les brochets se déplacent sur de plus grandes distances quand le débit de la Seine est élevé (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 7.87e-11$, $\rho = 0.49$) et qu'il dépasse 50 m³/s (*kruskal.test* : $p\text{-value} = 1.53e-08$; *pairwise.wilcox.test* : $p\text{-value} \ll 0.05$ entre débits < 50 m³/s et débits > 50 m³/s).

Les valeurs de température et de débit qui influencent les déplacements des brochets sont atteintes entre les mois de janvier, ce qui correspond avec ce qu'on observe sur la figure 4. Les brochets se déplacent donc sur de plus grandes distances pendant leur période de migration et de reproduction.

3.1.3 Domaine vital des brochets

Le domaine vital total est très hétérogène d'un individu à l'autre (Annexe XV). Il s'étend sur 350 mètres au minimum pour le brochet 89 et peut aller jusqu'à plus de 30 km au maximum pour le brochet 212. Ces différences ne sont pas influencées par la taille des brochets (*cor.test* : $p\text{-value}=0.98$, $\rho = -0.007$) ou par leur sexe (*wilcox.test* : $p\text{-value}=0.28$). On observe cependant une différence significative entre les domaines vitaux totaux selon l'âge des brochets. Les brochets les plus âgés ont tendance à occuper des espaces plus importants que les plus jeunes (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 0.026$, $\rho = 0.589$). En comparant la période de migration avec la période post-reproduction, on remarque que les brochets les plus âgés ont un domaine vital plus important pendant la période post-reproduction même si la corrélation n'est pas significative (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 0.097$, $\rho = 0.501$). Il n'y a en revanche pas de différence entre individus lors de la période de migration.

On observe une différence entre les périodes de migration et post-reproduction en ce qui concerne la taille moyenne des domaines vitaux. Celle-ci est beaucoup plus importante pendant la période de migration des brochets (*wilcox-test* : $p\text{-value} = 9.516e-05$) soit entre janvier et avril avec une taille moyenne de 4km contre seulement 800 mètres en moyenne pendant la période post-reproduction. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus précédemment qui montraient que les individus se déplaçaient sur de plus grandes distances pendant la période de migration/reproduction.

Il existe également une différence très marquée entre les deux biefs de Jaulnes et du Vezoult (Figure 6) en ce qui concerne la taille du domaine vital des brochets. Pendant la période de migration, il n'y a pas de différence significative entre l'espace occupé par les brochets sur les deux biefs. On observe toutefois que le domaine vital des individus présents dans le bief de Jaulnes tend à être plus important que celui des individus du bief du Vezoult (Annexes XI et XII) avec un domaine vital de 5,5 km en moyenne contre 1,5 km. En revanche, on obtient les résultats inverses pendant la période post-reproduction. En effet, pendant cette période, les individus de Jaulnes ont un domaine vital considérablement réduit (0,212 km en moyenne) comparé aux brochets du bief du Vezoult (1,96 km en moyenne) (*wilcox.test* : $p\text{-value}=0.0218$). La majorité des brochets occupent le bras du Vezoult et on observe très peu d'individus au sein même du chenal (Annexe XI). On note qu'entre les deux périodes, l'espace vital occupé par les brochets présents dans le bief du Vezoult varie très peu et reste

sensiblement le même avec une taille moyenne d'environ 1,7 km. Les brochets sont majoritairement présents dans la partie amont du bief qui n'est pas naviguée (Annexe XII).

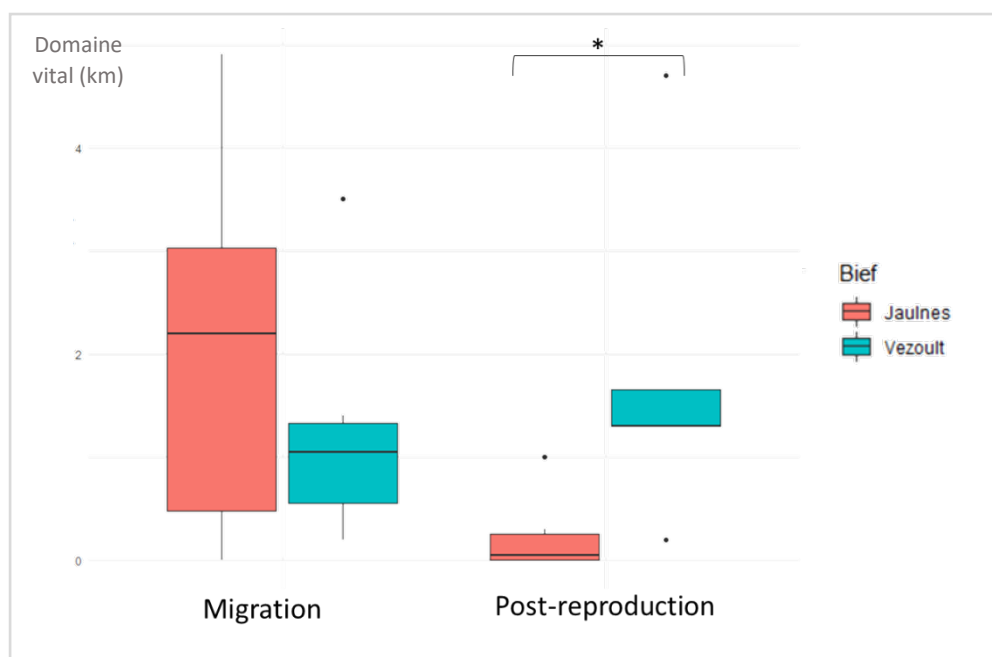


Figure 6 : Boxplot représentant la taille du domaine vital des brochets en fonction de la période et en fonction du bief dans lequel ils se trouvent. Les résultats du bief de Jaulnes sont représentés en orange et ceux du bief du Vezoult en bleu. Les différences significatives sont indiquées par l'astérisque.

3.2 Suivi des frayères de Jaulnes et de Villiers-Sur-Seine

3.2.1 Données biologiques

3.2.1.1 Diversité piscicole

Des brochetons ont été capturés dans chacune des frayères de Jaulnes et de Villiers en 2020, mais aussi pendant les années précédentes. Mais le brochet n'est pas la seule espèce que l'on trouve dans les frayères (Tableau 1). En effet, lors des pêches électriques, plusieurs autres espèces y ont été trouvées. Parmi elles se trouvent des espèces patrimoniales telles que l'anguille commune *Anguilla anguilla* ou la loche de rivière *Cobitis taenia* qui sont des espèces protégées en France. On peut aussi y trouver des perches *Perca fluviatilis*, des tanches *Tinca tinca* ou encore des ablettes *Alburnus alburnus*. Ces poissons vont utiliser les frayères comme lieu de grossissement ou lieu de refuge.

On peut également noter la présence de deux espèces invasives dans les frayères. Des perches soleil *Lepomis gibbosus* ont été capturées à plusieurs reprises sur les deux sites. En 2020, un individu de l'espèce *Pseudorasbora parva* a également été observé dans la frayère de Villiers. Ce poisson invasif originaire d'Asie est considéré comme étant nuisible, car il est porteur d'un parasite (*Sphaerothecum destruens*) qui peut entraîner une forte mortalité de l'ichtyofaune native (Keith *et al.*, 2011).

Tableau 1 : Récapitulatif des espèces capturées au cours des pêches électriques effectuées dans les frayères de Jaulnes et de Villiers entre 2016 et 2020.

	Frayère de Villiers		Frayère de Jaulnes	
	Richesse spécifique	Espèces	Richesse spécifiques	Espèces
2016	NA	NA	2	Brochet ; Loche de rivière
2017	5	Loche de rivière ; Perche soleil ; Perche ; Tanche ; Cyprinidés	1	Anguille
2018	6	Loche de rivière ; Perche soleil ; Perche ; Tanche ; Ablette ; Brème bordelière	4	Brochet ; Perche ; Tanche ; Ablette
2019	4	Brochet ; Loche de rivière ; Perche soleil ; Tanche	5	Brochet ; Anguille ; Tanche ; Rotengle ; Chabot
2020	5	Brochet ; Loche de rivière ; Perche soleil ; Tanche ; <i>Pseudorasbora parva</i>	1	Brochet

De manière générale, on observe une amélioration de la diversité piscicole dans les deux frayères. On remarque toutefois que la richesse spécifique de Jaulnes est plus faible en 2020 avec seulement des captures de brochetons.

3.2.1.2 Population de brochets

En 2020, deux cohortes de brochetons ont été observées dans la frayère de Villiers : une cohorte avec des individus entre 40 et 50 mm et une autre avec des individus entre 70 et 100 mm (Figure 7). Ces résultats mettent en évidence deux reproductions ayant eu lieu au sein de cette frayère.

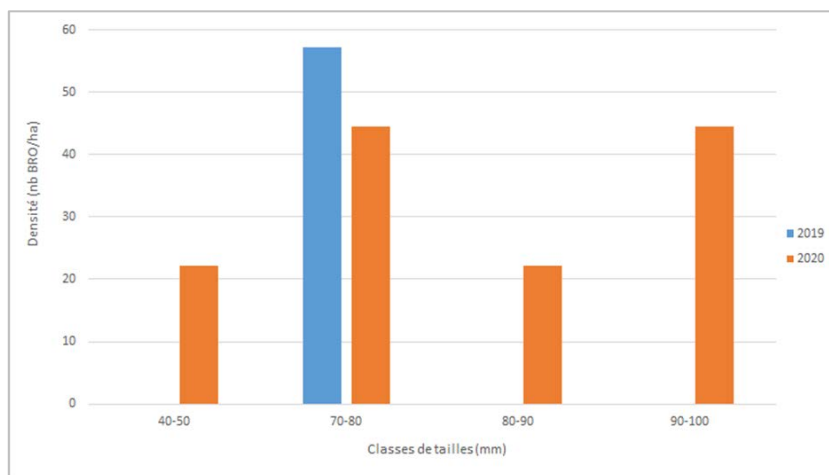


Figure 7 : Graphique représentant la densité des différentes classes de taille de brochetons présentes dans la frayère de Villiers.

Ce n'est pas le cas de la frayère de Jaulnes dans laquelle seulement une cohorte d'individus entre 80 et 120 mm a été observée au cours de la pêche électrique. Il n'y aurait donc eu qu'une seule reproduction de brochets sur cette frayère (Figure 8).

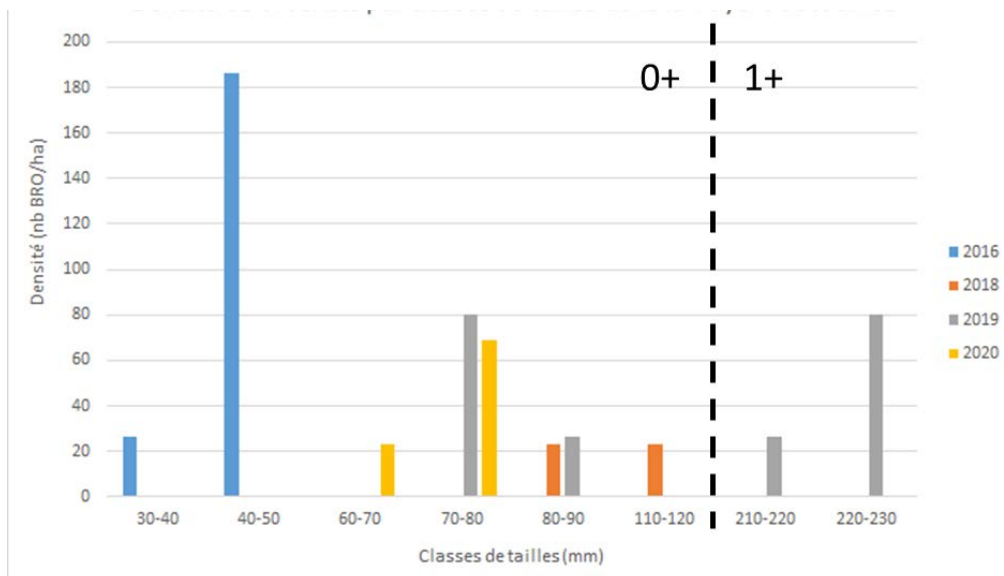


Figure 8 : Graphique représentant la densité des différentes classes de taille de brochetons présentes dans la frayère de Jaulnes.

3.2.1.3 Productivité des frayères

La reproduction de brochets a été observée depuis 2016 dans la frayère de Jaulnes et depuis 2019 dans la frayère de Villiers. La productivité de cette dernière est en hausse depuis l'année dernière, cela montre bien l'efficacité de l'ouverture du milieu. Dans le cas de la frayère de Jaulnes, on observe une légère baisse de productivité en 2020 (Figure 9). De manière générale, on peut affirmer que les frayères de Jaulnes et de Villiers sont fonctionnelles pour la reproduction du brochet depuis leurs travaux de restauration.

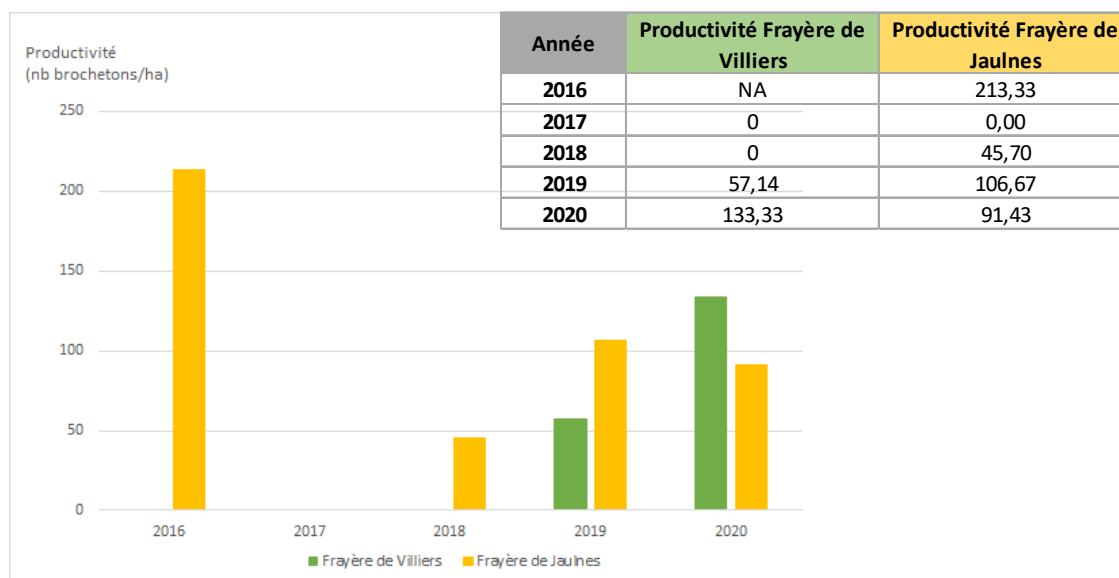


Figure 9 : Productivité des frayères de Jaulnes et de Villiers entre 2016 et 2020 avec le tableau des valeurs correspondantes

3.2.2 Données abiotiques

3.2.2.1 Hauteur et température de l'eau

Dans les deux frayères, la hauteur d'eau est corrélée avec les valeurs de débit de la Seine (*cor.test spearman Jaulnes* : $p\text{-value} = 7.072e-09$, $\rho = 0.45$; *cor.test Villiers* : $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = 0.88$). Cette corrélation est vérifiée pour toutes les valeurs de débit pour la frayère de Villiers, mais ce n'est pas le cas pour la frayère de Jaulnes. En effet, pour cette dernière, la corrélation entre la hauteur d'eau dans la frayère et le débit de la Seine est seulement positive quand le débit est supérieur à $100\text{m}^3/\text{s}$ (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 7.072e-09$, $\rho = 0.45$). Cela correspond à des périodes pendant lesquelles les barrages sont ouverts, c'est-à-dire des périodes de crues. En revanche, quand le débit est inférieur à $100\text{m}^3/\text{s}$, la hauteur d'eau dans la frayère de Jaulnes est corrélée négativement au débit de la Seine (*cor.test spearman* : $p\text{-value} = 0.000001$, $\rho = -0.45$). Cela est dû à la gestion artificielle de la frayère qui permet de maintenir un niveau d'eau suffisant quand le débit est faible en fermant les vannes.

À partir de ces résultats, il a pu être déterminé que pour un débit de $100\text{ m}^3/\text{s}$, la hauteur d'eau des frayères atteignait le seuil minimal de 20 cm favorable à la reproduction des brochets. Cette valeur de débit se rapproche du module entre janvier et mars (111 à $124\text{ m}^3/\text{s}$) (Annexe XVI) ce qui montre que les hauteurs d'eau favorables sont atteintes à cette période de l'année dans les frayères.

La température de l'eau relevée dans les frayères est corrélée positivement avec la température atmosphérique sur les deux sites suivis (*cor.test Jaulnes* : $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = 0.86$; *cor.test Villiers* : $p\text{-value} < 2.2e-16$, $\rho = 0.86$). À partir de cette corrélation, il a été déduit que le seuil de températures favorables à la reproduction des brochets (entre 6°C et 14°C) était atteint lorsque la température atmosphérique se situait entre 8°C et 15°C .

3.2.2.2 Période favorable à la reproduction du brochet

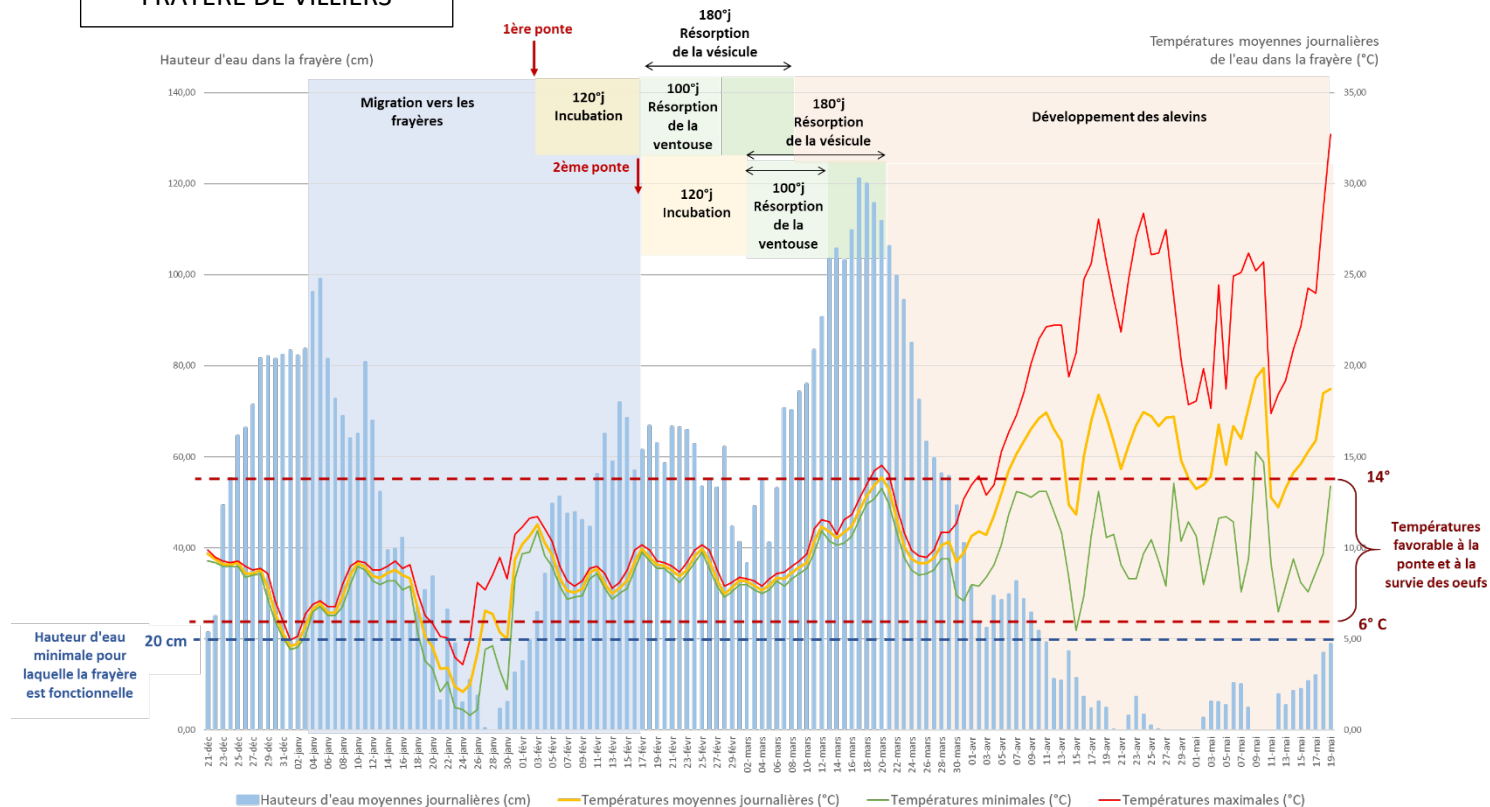
Pour les deux frayères de Jaulnes et de Villiers, les conditions favorables à la reproduction des brochets sont atteintes entre le mois de février et mars.

Plus précisément, dans la frayère de Villiers les conditions favorables sont observées entre le 3 février et le 30 mars, ce qui représente un total de 56 jours pendant lesquels les valeurs de température et de hauteur d'eau étaient optimales pour la reproduction. Ces valeurs restent stables pendant toutes les étapes du développement des brochetons (Figure 10).

Dans la frayère de Jaulnes, ces conditions favorables ne sont observées que pendant 46 jours, entre le 12 et le 29 février, soit dix jours de moins que dans la frayère de Villiers. Les valeurs de température restent stables pendant toute la durée des étapes de développement du brochet, mais ce n'est pas le cas pour les valeurs de hauteur d'eau. En effet, on observe une forte baisse du niveau d'eau pendant la période de résorption de la vésicule avec une diminution d'environ 15 cm en quelques jours (Figure 10).

Dans les deux frayères, l'amplitude de température journalière augmente à partir du mois d'avril qui correspond à la période de croissance des brochetons et à leur retour dans le cours d'eau principal.

FRAYÈRE DE VILLIERS



FRAYÈRE DE JAULNES

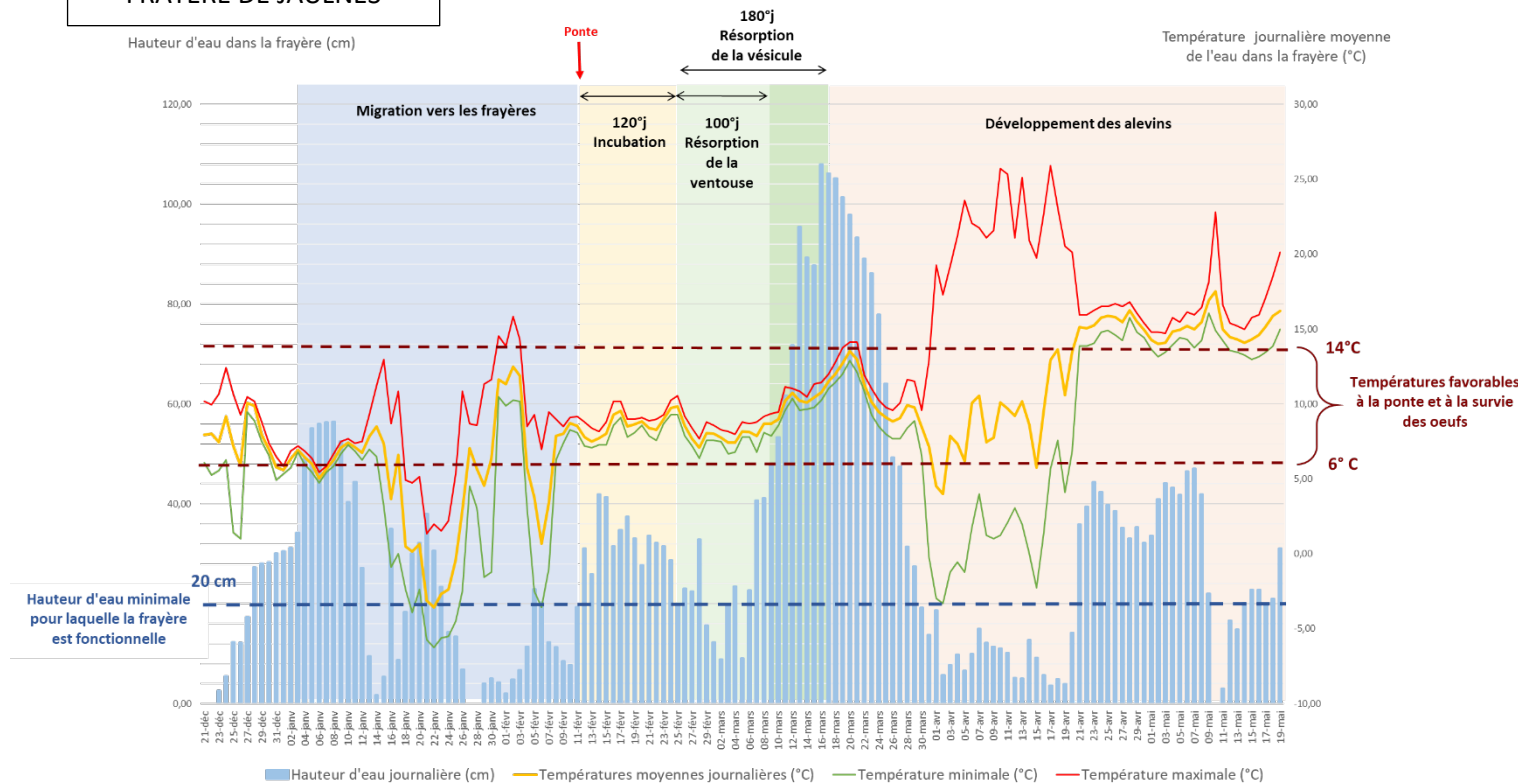


Figure 10 : Hauteur d'eau et température de l'eau enregistrées dans les frayères de Villiers (graphe du haut) et de Jaulnes (graphe du bas). Les seuils de conditions favorables à la reproduction du brochet sont indiqués par les traits en pointillés. Les étapes de développement du brochet ont été délimitées d'après les valeurs seuils, lorsque les conditions de hauteur d'eau et de températures étaient vérifiées.

3.2.3 Préconisation des mesures de gestion

Dans les deux frayères, l'objectif est de maintenir les milieux ouverts dans le but de favoriser la présence de végétation herbacée. Pour ce faire, l'instauration d'un système de pâturage est envisagée.

Dans le cas de la frayère de Jaulnes, il est préconisé de fermer les vannes dès que le débit passe en dessous des 100 m³/s à partir des mois de mars/avril. Cela permettra à la frayère de conserver une hauteur d'eau suffisante pour le développement des brochetons.

Il faudrait ensuite ouvrir les vannes en juin/juillet pour que les brochetons puissent rejoindre la Seine et que la végétation puisse se régénérer. L'ouverture de la frayère se poursuivra jusqu'aux mois de février/mars de l'année suivante pour permettre aux géniteurs de rentrer dans la frayère.

4 Discussion

4.1 Migration holobiotique des brochets

Parmi les 24 brochets marqués, 17 ont été retrouvés par le radiopistage. Cependant, tous ces individus n'ont pas été détectés toute la durée de l'étude. Certains n'ont été détectés qu'une seule fois (brochets 33, 80 et 175) et des brochets captés en hiver entre janvier et mars n'ont pas été retrouvés à la reprise des suivis fin avril (brochets 53 et 146). Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ces taux de détection. Il est d'abord possible que des brochets soient morts au cours de l'étude. Leur émetteur serait alors tombé au fond du chenal rendant impossible leur détection. Il se peut aussi que certains individus aient été capturés par des pêcheurs sans que l'on en soit informé. Enfin, il est probable que des poissons se soient déplacés en dehors de la zone d'étude, soit plus à l'aval après Bray-sur-Seine, ou alors plus à l'amont dans le département de l'Aube. Ces secteurs n'ont été prospectés qu'une seule reprise sans succès, mais un nombre plus important de sorties auraient peut-être permis de détecter de nouveaux brochets. Le même constat peut être fait en ce qui concerne les tributaires de la Seine. Parmi ces derniers, seules la Noue de Jaulnes et la Vieille Seine ont été prospectées avec deux détections au niveau de la Noue. Mais des individus ont aussi pu se déplacer dans d'autres annexes. Des études ont démontré que les brochets migraient vers les annexes du cours d'eau principal pendant la période de reproduction (Gonzales, 2018 ; Masters *et al.*, 2005). Les annexes hydrauliques peuvent également être empruntées par les brochets dans le but de contourner un obstacle. Ce comportement a été observé par la FDAAPPMA 59 (2013) lors de leur étude sur les brochets. Dans notre cas, cela a pu être la stratégie adoptée par le brochet 197, qui a peut-être emprunté la Noue de Jaulnes pour contourner le barrage et remonter dans le bief de Jaulnes.

De manière générale, cette étude a mis en évidence des ruptures de continuité écologique sur la zone étudiée dues à la présence des deux barrages-écluse. La majorité des brochets sont restés dans leur bief d'origine et les poissons qui se sont aventurés au-delà des barrages ont profité des pics de crues pendant lesquels les barrages étaient ouverts et la continuité était partiellement restaurée. Les passes à poissons présentes au niveau des barrages ne semblent pas fonctionnelles pour le passage des brochets, car aucun des individus marqués n'y a été détecté. Le courant y est probablement trop important pour le passage de cette espèce qui préfèrent les milieux plus lenticules (Keith *et al.*, 2011). Le passage des brochets par les écluses

à bateaux est possible, mais cela est généralement accidentel compte tenu du manque d'attractivité de ces ouvrages (Travade & Larinier, 1992).

Les deux principaux facteurs qui ont une influence sur les déplacements des brochets sont le débit et la température de l'eau. Dans cette étude, on a pu montrer que les distances parcourues par les individus étaient plus importantes lorsque le débit est supérieur à 50 m³/s et lorsque les températures sont en hausses jusqu'à 10°C. Ces résultats sont en accord avec ce que l'on retrouve dans la bibliographie. De nombreuses études ont en effet démontré que les déplacements des brochets coïncidaient avec une hausse des températures ainsi qu'avec les périodes de crues (Koed *et al.*, 2006 ; Lucas, 1992 ; Masters *et al.*, 2005 ; Pauwels *et al.*, 2014). Pour Ovidio (2005), les mouvements des brochets étaient plus importants quand les températures augmentaient entre 6°C et 8°C et quand le débit se trouvait entre 51 et 199 m³/s.

Dans notre cas, ces conditions favorables à la migration des brochets sont observées entre les mois de janvier et avril. L'absence de suivi pendant le mois de mars et le début du mois d'avril n'a pas permis de suivre en continu le déplacement des brochets et certains mouvements migratoires n'ont pas pu être observés. Un suivi continu dans notre étude aurait sans doute permis d'affiner la période de migration de la même façon que Ovidio (2005), qui a montré que les brochets migraient entre début février et fin mars. Cette période peut évoluer en fonction des conditions environnementales. En effet, un retard à la migration pourrait être observé dans le cas d'un hiver sec pendant lequel les débits restent peu élevés. Par ailleurs, la migration des brochets tend à se produire de plus en plus tard en réponse au réchauffement climatique. Dans les régions septentrionales, les conditions favorables sont observées plus tard, la reproduction se produit alors pendant le mois d'avril voire en mai (Cook & Bergensen, 1998). Mais dans tous les cas, les brochets se déplacent de plus en plus pendant leur période de migration et cette conclusion se retrouve dans de nombreuses autres études (FDAAPPMA 59, 2013 ; FDAAPPMA 59, 2024 ; Namokel *et al.*, 2020).

Dans la Seine, aucun lien entre le débit et la température de l'eau n'a été observé. Cela montre que les forts débits vont induire les mouvements des brochets indépendamment de la température de l'eau. Dans une étude de Harvey-Lavoie *et al.* (2016), des observations similaires ont été faites dans une rivière dans laquelle le régime hydraulique est régulé par l'Homme comme l'est également la Seine. En revanche, dans une rivière non régulée, les déplacements des brochets étaient plus dépendants de la température de l'eau que du débit. Cela met en évidence l'influence que peuvent avoir les aménagements des rivières sur le comportement des brochets.

Les distances parcourues sont très variables d'un individu à l'autre. Certains vont très peu se déplacer pendant que d'autres vont effectuer de très grands trajets. Les mâles auraient tendance à se déplacer plus que les femelles. D'autres études ont mis en évidence des résultats similaires et expliqueraient cela comme une stratégie de reproduction polygyne (Knight, 2006 ; Lucas, 1992). Le mâle se déplacerait sur plusieurs sites de frai et chercherait à se reproduire avec plusieurs femelles. À l'inverse, des études ont montré que ce sont les femelles qui se déplaceraient sur des distances plus grandes que les mâles (FDAAPPMA 62, 2015 ; Jespsen, Beck *et al.*, 2001 ; Koed *et al.*, 2006). Cela serait dû au fait que les femelles visitent plusieurs frayères (jusqu'à 2 ou 3) pendant la période de reproduction (Wright, 1980). Ces résultats différents seraient sans doute liés aux différences de comportements que peuvent adopter les brochets dans des écosystèmes différents ou encore aux méthodes utilisées au cours de ces études.

Il ne semblerait pas avoir d'influence de la taille ou de l'âge des brochets sur le déplacement des individus que l'on a suivi. Cependant, plusieurs travaux ont mis en avant le fait que les brochets les plus grands parcourent de plus grandes distances que les brochets plus petits (Kobler *et al.*, 2008 ; Masters *et al.*, 2005 ; Vehanen *et al.*, 2006. Cela suggérerait que les plus grands individus se déplacent plus librement dans la rivière, comparés aux plus petits qui sont plus exposés à la prédation. Les marques d'érosion ou les lésions qui ont pu être observées au cours du marquage ne semblent également pas avoir de conséquence sur les capacités de déplacement des brochets. Plusieurs individus présentant des lésions au niveau de la mâchoire ou au niveau des opercules brachiaux sont parmi ceux qui se sont le plus déplacés comme le 212 ou le 127. Les brochets sont des poissons très résistants et leur comportement est peu impacté par des blessures ou même par les prises des pêcheurs. Des études ont montré qu'un brochet avec un leurre coincé dans sa mâchoire avait un comportement modifié pendant seulement quelques jours avant de retrouver ses activités habituelles (Arlinghaus, 2008). Klefoth *et al.*, a quant à lui montré que les brochets mettaient environ une semaine avant de retrouver leur comportement normal après avoir été capturé puis relâché par un pêcheur. Les brochets semblent donc être des individus avec une grande capacité de résilience.

4.2 Domaine vital

Le domaine vital des brochets est plus étendu pendant la période de migration entre janvier et avril. Cela est cohérent avec les distances parcourues qui sont plus grandes pendant cette période et qui correspondent au moment de recherche des frayères par les brochets. Ces résultats sont en accord avec ceux de Hodder *et al.* (2007) et Kobler *et al.* (2008).

On observe toutefois une différence de l'espace occupé entre les biefs de Jaulnes et du Vezoult. Le domaine vital plus étendu pour les individus du bief de Jaulnes pourrait être en lien avec le nombre et la surface des frayères présentes sur la zone et qui sont peu élevés. L'étude réalisée en 2016 par la FDAAPPMA 77 (Houeix *et al.*, 2017) a inventorié les frayères présentes en Seine. Dans cette étude, 3 frayères seulement ont été identifiées sur le bief de Jaulnes, ce qui représente une surface totale de 14500 m² de frayères, contre 6 dans le bief du Vezoult (soit une surface totale de 18 950 m²). On pourrait donc penser que les brochets présents dans le bief de Jaulnes aient plus de distance à parcourir pour trouver un site de frai favorable par rapport à ceux présents dans le bief du Vezoult. De plus, pas de nouveaux sites potentiels n'ont été repérés dans le bief de Jaulnes par rapport au bief du Vezoult, excepté sur la noue de Jaulnes (Annexe XIII). Cela pourrait expliquer que deux brochets l'aient traversée.

Pendant la période post-reproduction (à partir du mois d'avril), le domaine vital des individus est considérablement réduit dans le bief de Jaulnes et passe à une taille moyenne de 200m. En revanche, il reste sensiblement le même pour les poissons du bief du Vezoult. Le facteur principal qui semble déterminer l'occupation de l'espace par les brochets semble être la qualité de l'habitat piscicole.

En effet, dans le bief de Jaulnes, la majorité des détections sont faites dans le bras mort du Vezoult et très peu ont été réalisées au sein même du bief. Le bras mort du Vezoult est caractérisé par une hétérogénéité des habitats avec un bon développement de la végétation rivulaire ce qui crée des abris et des refuges pour les poissons (Lamarche & Marousé, 1995). Ce n'est pas le cas dans le bief où le milieu est plus homogène avec une vitesse d'écoulement similaire sur tout le linéaire et des profondeurs peu diversifiées (Annexe XIV). De plus, la

navigation très présente entraîne un niveau de matière en suspension assez élevé. Or il a été démontré dans une étude (Jepsen, Beck *et al.*, 2001) que dans un milieu turbide, le domaine vital des brochets était plus réduit que dans les eaux claires. Cette même étude a également mis en évidence le fait que la localisation des individus en milieu turbide est corrélée avec la présence de végétation. Il semblerait donc que dans un milieu pauvre en habitats piscicoles, les brochets restent dans une zone qui leur est favorable, avec la présence d'herbiers notamment, et ils ne vont pas explorer au-delà de cette zone.

Dans le bief du Vezoult, la majorité des brochets détectés sont localisés en amont de la zone, dans la partie non naviguée de la Seine. Tout comme dans le bief de Jaulnes, la partie canalisée du bief du Vezoult est un milieu relativement homogène avec une profondeur et une vitesse d'écoulement peu diversifiées. Ce n'est pas le cas dans la partie amont du bief où les vitesses de courant sont plus hétérogènes tout comme les profondeurs (Annexe XIV). Cette diversité permet le développement de macrophytes immergées, des habitats favorables à la présence des brochets (Casselman, 1996 ; Kobler *et al.*, 2008).

La qualité du milieu va également avoir un impact sur la disponibilité en proies pour le brochet. Un habitat plus hétérogène offrira plus de possibilités d'abris dans lesquels les espèces piscicoles viennent se réfugier. Eklöv (1997) a montré que le domaine vital des plus grands brochets (>160 mm) coïncide avec une densité importante de proies. Les brochets occupent alors des milieux plus ouverts pour maximiser leur rencontre avec leurs proies. Au contraire, les brochets plus petits (<160 mm) restent dans des habitats où la végétation est dense pour éviter la prédation d'autres carnassiers. Les plus petits brochets auraient donc un domaine vital plus réduit que celui des grands individus. Ces résultats montrent aussi l'importance des annexes hydrauliques dans lesquelles les brochetons peuvent se développer à l'abri de la majorité des prédateurs. Aucune relation n'a été mise en évidence entre le domaine vital et la taille des brochets dans notre étude. En revanche, il a été montré que les brochets les plus âgés avaient un domaine vital plus étendu que les autres. L'âge des brochets étant corrélé avec leur taille (Chancerel, 2003), les résultats concernant les domaines vitaux rejoignent les observations faites par Eklöv (1997).

4.3 Suivi des frayères de Jaulnes et de Villiers

Les deux frayères suivies sont fonctionnelles depuis leurs travaux d'entretien. La crue ayant observée en mars (avec une valeur maximale de 284 m³/s) semble correspondre à une crue biannuelle (Annexe XVII). Cela montre que les frayères présentes dans le secteur d'étude sont fonctionnelles pendant de petites crues.

Les conditions stables de température et de hauteur d'eau dans la frayère de Villiers ont permis d'observer deux cohortes venant de deux reproductions différentes.

Ce n'a pas été le cas dans la frayère de Jaulnes dans laquelle la hauteur d'eau n'a pas toujours été stable pendant la période de reproduction. Cela est dû à la gestion artificielle des vannes qui contrôlent l'ouverture ou la fermeture de la frayère. Cette gestion n'était pas suffisamment adaptée au cycle de reproduction du brochet car elle repose sur les périodes théoriques de reproduction et non sur les conditions de fonctionnalité des frayères. Ainsi, en 2020, les vannes ont été fermées trop tard (21 avril) alors que le niveau d'eau dans la frayère avait déjà considérablement diminué depuis le 30 mars. De plus, le mécanisme des vannes n'est pas protégé et plusieurs manœuvres illégales ont eu lieu. C'est le cas notamment pendant la deuxième moitié du mois de janvier où les vannes ont été fermées ce qui n'aurait pas dû se produire. Cette incivilité est probablement la cause qui a entraîné un retard de 10

jours de la ponte en comparaison avec la frayère de Villiers. Par ailleurs, le niveau d'eau dans la frayère de Jaulnes est en moyenne plus bas que celui de la frayère de Villiers (respectivement 30 cm et 43 cm en moyenne). Par conséquent, une légère baisse observée dans la frayère de Villiers va prendre une autre ampleur dans la frayère de Jaulnes. C'est ce qui est observé entre le 1^{er} et le 5 mars où la hauteur d'eau à Jaulnes chute jusqu'à un minimum de 5cm. Ce niveau d'eau très bas n'est pas favorable au développement des alevins qui nécessite une hauteur d'eau de 20 cm minimum (Chancerel, 2003). Ces fortes variations de niveau d'eau dans la frayère de Jaulnes peuvent expliquer en partie le faible taux de capture de brochetons pour l'année 2020 comparée à l'année 2019. En effet, d'après Casselman *et al.* (1996), le niveau et la stabilité de la hauteur d'eau sont les facteurs qui vont déterminer le nombre de brochetons présents dans la frayère.

Bien que la température de l'eau et la hauteur d'eau soient les paramètres les plus déterminants pour la reproduction des brochets, ce ne sont pas les seuls paramètres à prendre en compte. Le pH, la turbidité, le taux d'oxygène dissous ou encore la végétation aquatique sont autant de paramètres qui vont avoir une influence sur le succès de reproduction du brochet (Chancerel, 2003). Une étude sur les frayères à brochets menées dans les Marais de l'Erdre par la FDAAPPMA 44 (Deshayes F., 2013) a montré que malgré une majorité des paramètres favorables à la reproduction des brochets, un problème d'hypoxie ainsi qu'une période de froid en mars n'ont pas permis d'avoir un succès dans le recrutement.

Un suivi des paramètres physico-chimique était initialement prévu au sein des frayères de Jaulnes et de Villiers, mais cela a malheureusement été rendu impossible à cause de la crise sanitaire du Covid-19. Il serait tout de même intéressant d'en réaliser un lors de la prochaine saison de reproduction des brochets.

5 Conclusion

Le premier objectif de cette étude a permis de mettre en évidence une rupture de la continuité écologique sur la zone d'étude. En effet, la majorité des brochets suivis sont restés dans leur bief d'origine et très peu ont franchi les barrages. La population de brochets est cloisonnée par bief qui ont chacun des caractéristiques différentes. La partie amont du bief du Vezoult, moins soumis aux pressions anthropiques, semble offrir une meilleure qualité d'habitats piscicoles et un accès plus favorable aux frayères pour les brochets en comparaison avec la partie canalisée de la zone d'étude. Cet objectif a également permis d'identifier les paramètres qui favorisaient les déplacements des brochets : une température en hausse jusqu'à 10°C et un débit supérieur à 50 m³/s. Ces conditions sont observées entre les mois de janvier et d'avril, ce qui correspond à la période de migration.

Le deuxième objectif de l'étude a quant à lui mis en évidence les paramètres pour lesquels les frayères sont fonctionnelles pour la reproduction du brochet. On a ainsi pu déterminer qu'à partir d'un débit de 100 m³/s, la frayère était suffisamment en eau et dépassait le seuil de 20cm. Pour les deux frayères, les conditions optimales de températures et de hauteurs d'eau ont été observées entre début février et fin mars. Une période suffisamment longue pour permettre la reproduction des brochets qui a été avérée par les pêches électriques.

Les résultats obtenus à l'issue de ces deux objectifs nous ont permis d'en apprendre plus sur les paramètres influençant les déplacements et la reproduction des brochets. La période de migration identifiée aurait cependant pu être plus précise si l'on avait eu la possibilité de continuer le suivi pendant le mois de mars. Il aurait également été judicieux d'augmenter la

fréquence de suivi au mois de décembre pour vraiment identifier le début des comportements migratoires des brochets. Malgré cela, nos résultats sont cohérents avec ce que l'on peut retrouver dans la littérature. Néanmoins, un jeu de données plus important aurait permis de rendre les analyses statistiques plus robustes. Il serait intéressant de poursuivre les suivis par radiopistage jusqu'à l'année prochaine pour conforter les résultats déjà obtenus. Étant donnée la durée de vie des émetteurs d'environ deux ans, cela serait envisageable d'autant plus que les silures marqués au même moment que les brochets vont continuer à être suivis à la suite de ce projet. En ce qui concerne l'étude des frayères, le suivi des paramètres physico-chimiques n'a malheureusement pas pu être réalisé. Il serait intéressant de le faire dans les années à venir pour voir s'ils ont une influence sur la reproduction des brochets.

Les deux derniers objectifs de l'étude sont en cours de réalisation et permettront de compléter les résultats obtenus. L'étude hydrobiologique permettra de faire une comparaison plus poussée entre les deux niveaux d'anthropisation de la zone d'étude. Pour cela, un inventaire piscicole sera réalisé ainsi qu'une caractérisation du peuplement de macro-invertébrés et une analyse de l'ADN environnemental piscicole et bivalves. Les premiers prélèvements ont été effectués en juillet et en août et ils seront analysés prochainement. De plus, des mesures vont être réalisées sur trois autres frayères à brochets présentes dans la zone afin de les délimiter précisément et d'évaluer les travaux de restauration qui pourraient être envisagés.

Bibliographie

- Arlinghaus R., Klefoth T., Gingerich A.J., Donaldson M.R., Hanson K.C. & Cooke S.J. (2008) Behaviour and survival of pike, *Esox lucius*, with a retained lure in the lower jaw. *Fisheries Management and Ecology*, 15(5-6), 459-466.
- Casselman J.M. & Lewis C.A. (1996) Habitat requirements of northern pike (*Esox lucius*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53(S1), 161-174.
- Deshayes F. (2013) Suivi de frayères à brochets (*Esox lucius*) sur les marais de l'Erdre (Loire-Atlantique). Rapport de stage de Master 2, Université de Nantes, 58p.
- Elosegi A. & Sabater S. (2013) Effects of hydromorphological impacts on river ecosystem functioning: a review and suggestions for assessing ecological impacts. *Hydrobiologia*, 712(1), 129-143.
- Eklöv P. (1997) Effects of habitat complexity and prey abundance on the spatial and temporal distributions of perch (*Perca fluviatilis*) and pike (*Esox lucius* L.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(7), 1520-1531.
- FDAAPPMA 59 (2013) Etude comportementale du brochet par radiopistage sur la Sambre Canalisée.
- FDAAPPMA 59 (2014) Etude des mouvements saisonniers et des habitats préférentiels au cours d'un cycle annuel chez le Grand Brochet (*Esox lucius* L., 1758) par radiopistage sur la Rivière Sambre (59) en 2013-2014
- FDAAPPMA 77 (2015) Plan Départementale pour la Protection du Milieu Aquatique et la Gestion des ressources piscicoles de Seine-et-Marne.
- FDAAPPMA 62 (2015). Étude par radiopistage de conditions de reproduction des brochets en milieu canalisés. Delta de l'Aa : Canaux de Guînes et Ardres.
- Gonzales G. (2018) Etude comportementale du brochet dans la vallée de Meuse. Rapport de stage, ENGEES, 94 p.
- Harvey-Lavoie S., Cooke S.J., Guénard G. & Boisclair D. (2016) Differences in movements of northern pike inhabiting rivers with contrasting flow regimes. *Ecohydrology*, 9(8), 1687-1699.
- Hodder K.H., Masters J.E., Beaumont W.R., Gozlan R.E., Pinder A.C., Knight C.M. & Kenward R.E. (2007) Techniques for evaluating the spatial behaviour of river fish. In *Developments in Fish Telemetry* (pp. 257-269).

- Houeix K., Lesimple M., Villalta R. (2017) Etudes des frayères à brochets sur les axes navigables de Seine-et-Marne.
- Hupp C.R., Pierce A.R. & Noe G.B. (2009) Floodplain geomorphic processes and environmental impacts of human alteration along coastal plain rivers, USA. *Wetlands*, 29(2), 413-429.
- Jepsen N., Beck S., Skov C. & Koed, A. (2001) Behavior of pike (*Esox lucius* L.) > 50 cm in a turbid reservoir and in a clear water lake. *Ecology of Freshwater Fish*, 10(1), 26-34.
- Jepsen N., Koed A., Thorstad E.B. & Baras E. (2002) Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: how much have we learned?. In *Aquatic Telemetry* (pp. 239-248).
- Kingsford R.T. (2000) Ecological impacts of dams, water diversions and river management on floodplain wetlands in Australia. *Austral Ecology*, 25(2), 109-127.
- Keith P., Persat H., Feunteun E. & Allardi, J. (2011). *Les poissons d'eau douce de France*. Biotope.
- Klefoth T., Kobler A. & Arlinghaus R. (2008). The impact of catch-and-release angling on short-term behaviour and habitat choice of northern pike (*Esox lucius* L.). *Hydrobiologia*, 601(1), 99-110.
- Knight C.M. (2006) *Utilisation of off-river habitats by lowland river fishes* (Doctoral dissertation, Durham University).
- Kobler, A., Klefoth T., Wolter C., Fredric, F. & Arlinghaus R. (2008) Contrasting pike (*Esox lucius* L.) movement and habitat choice between summer and winter in a small lake. *Hydrobiologia*, 601(1), 17.
- Koed A., Balleby K., Mejlhede P. & Aarestrup K. (2006) Annual movement of adult pike (*Esox lucius* L.) in a lowland river. *Ecology of Freshwater Fish*, 15(2), 191-199.
- Lamarche S., Marousé JL. (1995) Étude hydrobiologique et piscicole de la boucle du Vezoult (Noyen-sur-Seine, Seine-et-Marne). Conseil Supérieur de la Pêche, Compiègne: 15 p.
- Lucas M.C. (1992) Spawning activity of male and female pike, *Esox lucius* L., determined by acoustic tracking. *Canadian Journal of Zoology*, 70(1), 191-196.
- Masters J.E.G., Hodder K.H., Beaumont W.R.C., Gozlan R.E., Pinder A.C., Kenward, R.E. & Welton, J.S. (2005) Spatial Behaviour of Pike *Esox Lucius* L. in the River Frome, UK.
- Namokel Y., Rigault B., Pinson-Tabary G. & Crowyn G. (2020). Focus Biodiversité Marais Audomarois. Fédération du Pas-de-Calais pour la pêche et la protection des milieux aquatiques (FDAAPMA 62) 384p.
- Ovidio M. (2005) Long-range seasonal movements of northern pike (*Esox lucius* L.) in the barbel zone of the River Ourthe (River Meuse basin, Belgium). *Aquatic telemetry: advances and applications*, 191-2002.
- Pauwels I.S., Goethals P.L., Coeck J. & Mouton, A. M. (2014) Movement patterns of adult pike (*Esox lucius* L.) in a Belgian lowland river. *Ecology of Freshwater Fish*, 23(3), 373-382.
- Picourlat, F., Jost, A., Teillaud, S., Passy, P., Baratelli, F., & Flipo, N. (2018) Impact des aménagements anthropiques dans la plaine de la Bassée: le cas des gravières. Rapport Piren-Seine phase VII, 10p.
- Travade, F., & Larinier, M. (1992). Ecluses et ascenseurs à poissons. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (326-327), 95-110.
- UICN Comité français, MNHN, SFI & AFB (2019) La Liste rouge des espèces menacées en France – Chapitre Poissons d’eau douce de France métropolitaine. Paris, France.
- Vehanen T., Hyvärinen P., Johansson K. & Laaksonen T. (2006) Patterns of movement of adult northern pike (*Esox lucius* L.) in a regulated river. *Ecology of freshwater fish*, 15(2), 154-160.
- Wright R.M. (1980) The ecology of pike: aspects of population biology and movement of pike (*Esox lucius* L.) as determined by ultrasonic tracking in an artificial reservoir (Doctoral dissertation, Loughborough University).

Résumé

Les modifications des cours d'eau par l'Homme pour y naviguer ont de fortes conséquences sur la qualité des habitats piscicoles ainsi que sur la fonctionnalité des zones humides. La dégradation de ces milieux impacte grandement le cycle de vie du brochet *Esox lucius* qui utilise les zones humides comme zone de frayère. Dans cette étude, nous avons dans un premier temps étudié la migration holobiotique des brochets dans la partie amont de la Seine en Seine-et-Marne. Pour ce faire 24 brochets ont été marqués avec des émetteurs radio puis suivis par radiopistage. Les résultats ont mis en évidence une rupture de la continuité écologique sur la zone d'étude. La population de brochets est cloisonnée par biefs et très peu d'individus ont franchi les barrages. La période de migration coïncide avec une hausse des températures de l'eau jusqu'à 10°C et un débit supérieur à 50 m³/s, des conditions observées entre les mois de janvier et avril. Dans la deuxième partie de l'étude, deux frayères à brochets ayant fait l'objet de travaux de restauration ont été suivies. D'après les résultats des pêches électriques, les deux sites sont fonctionnels à la reproduction du brochet. Le suivi des températures et de hauteurs d'eau dans les frayères a permis de mettre en avant une fenêtre de conditions favorables à la reproduction entre février et mars pour un débit de 100 m³/s.

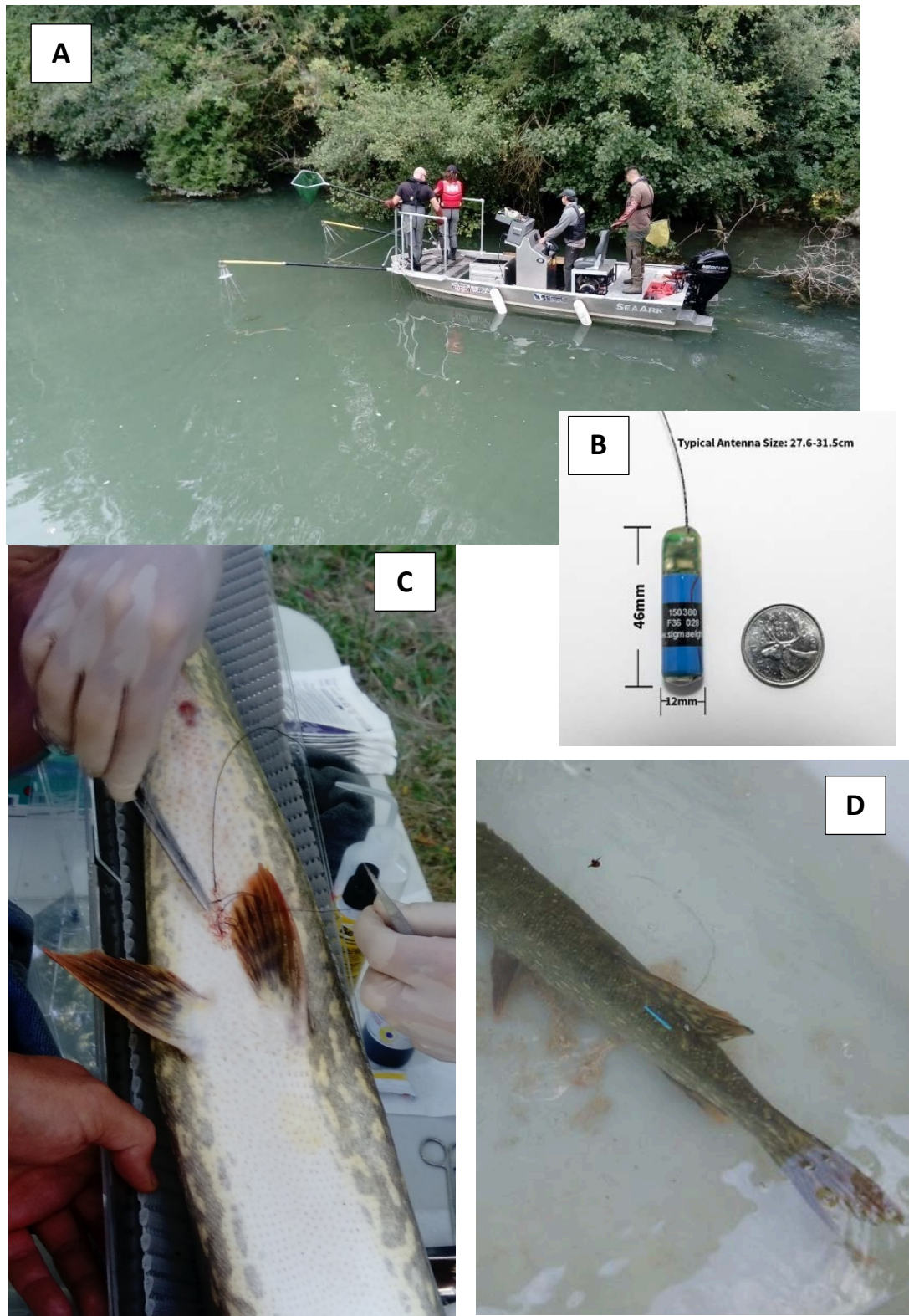
Mots clés : brochets, migration, radiopistage, frayères, continuité écologique

Abstract

Rivers modifications by Men have serious consequences on habitat quality and wetland functionality. These environmental degradations have a great impact on northern pike (*Esox lucius*) cycle, which uses wetlands as spawning sites. In this study, we first worked on the holobiotique migration of northern pike in the upstream part of the river Seine in Seine-et-Marne. In this purpose, we tracked 24 pikes implanted with radio transmitters. The results highlighted a rupture in the ecological continuity on the study area. The river sections delimited by dams and sluices compartmentalise the pike population and only a few individuals managed to pass through the obstacles. The migration period coincides with an increase of water temperatures up until 10°C and a flow rate higher than 50 m³/s, which correspond to conditions observed between January and April. In the second part of the study, we monitored two spawning sites that have been previously restored. According to electric fishing results, we can attest that these two spawning site are functional for pike reproduction. The recording of water levels and temperatures shown that the optimal conditions for spawning are found between February and March with a flow rate of 100 m³/s.

Key words: Northern Pike, migration, spawning site, ecological continuity

Annexe I



Annexe I : Illustrations des opérations de marquage des brochets. (A) : Capture des individus par pêche électrique depuis un bateau d'échantillonnage grand milieu. (B) : exemple d'émetteur implanté à l'intérieur des brochets. (C) : Suture de l'abdomen du brochet après intervention chirurgicale. (D) : Marque « spaghetti » de couleur bleue fixée à l'arrière de la nageoire dorsale du brochet.

Annexe II

Bief de remise à l'eau	ID	Fréquence (MHz)	Taille (cm)	Poids (g)	Age	Sexe	Date de marquage	Remarques	Etat sanitaire
Grande Bosse	BRO22	149,800	68	2089	-	Mâle	17/09/2019	capturer au Vezoult remis à jaulnes	Flanc érosion-hémorragie
Grande Bosse	BRO82	149,800	61	1524	3,8	Femelle	17/09/2019	capturer au Vezoult remis à jaulnes	Bec et caudale vert-bleu
Grande Bosse	BRO98	149,780	60,5	1241	2,8	Mâle	15/10/2019	capturer au Vezoult remis à jaulnes	RAS
Grande Bosse	BRO116	149,800	51	809	3,8	Mâle	17/09/2019	capturer au Vezoult remis à jaulnes	OK
Grande Bosse	BRO121	149,800	57,3	1134	3,8	Femelle	16/09/2019		Erosion tête
Grande Bosse	BRO175	149,780	65,4	1850	4,8	Femelle	15/10/2019	capturer au Vezoult remis à jaulnes	RAS
Grande Bosse	BRO197	149,780	51,5	797	2,8	Femelle	15/10/2019	capturer au Vezoult remis à jaulnes	Lésion mandibule inf. droite
1	7	7	7	7	6	3	3		
Vezoult	BRO1	149,800	104	7200	7,8	Femelle	18/09/2019		OK
Vezoult	BRO31	149,800	63,4	1431	2,8	Femelle	14/10/2019		Lésion mandibule inférieure
Vezoult	BRO33	149,800	52,1	454	1,8	Femelle	18/09/2019		Quelques parasites externes à déterminer
Vezoult	BRO44	149,800	72	2281	4,8	Femelle	18/09/2019		OK
Vezoult	BRO53	149,800	63,3	1835	3,8	Femelle	14/10/2019		Erosion flanc gauche, érosion - marque flanc droit
Vezoult	BRO74	149,800	47,8	667	2,8	Femelle	14/10/2019		Lésion mandibule inférieure droite, sous mandibule
Vezoult	BRO83	149,800	57,2	1471	4,8	Mâle	14/10/2019		RAS
Vezoult	BRO155	149,800	64,5	1697	3,8	Mâle	14/10/2019		Lésion bouche
Vezoult	BRO177	149,800	55,8	1166	3,8	Femelle	17/09/2019		RAS
Vezoult	BRO200	149,800	58,5	1222	2,8	Femelle	14/10/2019		RAS
Vezoult	BRO212	149,800	56,4	1103	3,8	Mâle	18/09/2019	recapturé par un pêcheur entre le 25/01 et le 26/01/2020	Marque flanc gauche, érosion - marque flanc droit
1	11	11	11	11	11	3	3		
Jaulnes	BRO63	149,800	63,9	1563	2,8	Femelle	15/10/2019		Lésion pédoncule caudal, érosion dessous nageoire anal
Jaulnes	BRO80	149,800	59	1326	1,8	Femelle	17/09/2019		RAS
Jaulnes	BRO89	149,800	50	952	2,8	Femelle	17/09/2019		OK
Jaulnes	BRO127	149,780	56,3	1106	2,8	Femelle	15/10/2019		Lésion opercule branchiale gauche, lésion mandibule inférieure gauche
Jaulnes	BRO146	149,780	56,3	1017	2,8	Mâle	15/10/2019	recapturé par un pêcheur le 02/11/2019	Lésion arrière opercule branchiale gauche
Jaulnes	BRO159	149,800	61	1515	3,8	Femelle	17/09/2019		RAS
1	6	6	6	6	6	1	2		
3	24	24	24	24	24	7	4		

Annexe II : Tableau regroupant les caractéristiques de tous les brochets marqués pendant l'étude.



Etude Brochet

Suivi des populations de Brochet sur l'axe Seine

Que faire si vous capturez un brochet !!

2 possibilités

1 - PRESENCE D'UNE MARQUE SPAGUETTI



1 - Prendre une photo du poisson et noter son poids et sa taille

2 - Relever le numéro sur la marque

3 - Relever le lieu de capture et remettez le à l'eau

4 - Envoyer les informations à votre Fédération

2 - ABSENCE DE MARQUE SPAGUETTI



1 - Prendre des photos du poisson* et noter sa taille

2 - Prélever 4 écailles sur chaque flanc

3 - Relever le lieu de capture et remettez le à l'eau

4 - Envoyer les écailles et les informations à votre Fédération



Zone de prélèvement des écailles

*** Faire des photos**

A envoyer à l'adresse mail ci-dessous

- 2 flancs du poisson
- papille génitale
- anomalies



Papille génitale d'un brochet

Méthode de prélèvement des écailles :

<http://new.federationpeche77.fr/brochets/>

Pour toute information et transmission

Fédération de Seine-et-Marne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique

22, rue des Juncs 77950 MONTEREAU SUR LE JARD

Tél : 01-64-39-03-08 mail : milieu.aquatique@federationpeche77.fr





Annexe III : Affiche de communication sur l'étude brochet en Seine

Annexe IV



Annexe IV : A : Suivi mobile sur la Seine en bateau. Le récepteur se trouve dans le sac à dos posé aux pieds de l'opérateur. Il est relié à l'antenne qui détecte les signaux émis par les brochets marqués. B : Poste fixe installé au niveau de la frayère de Jaulnes que l'on aperçoit en arrière-plan.

Annexe V

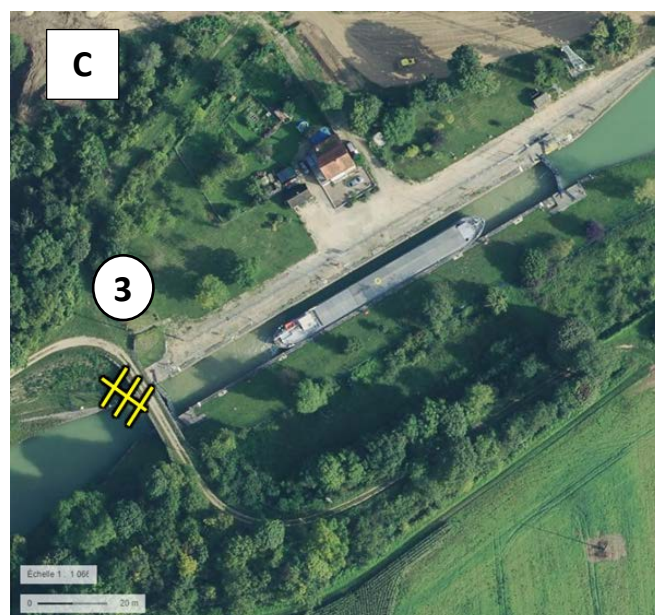
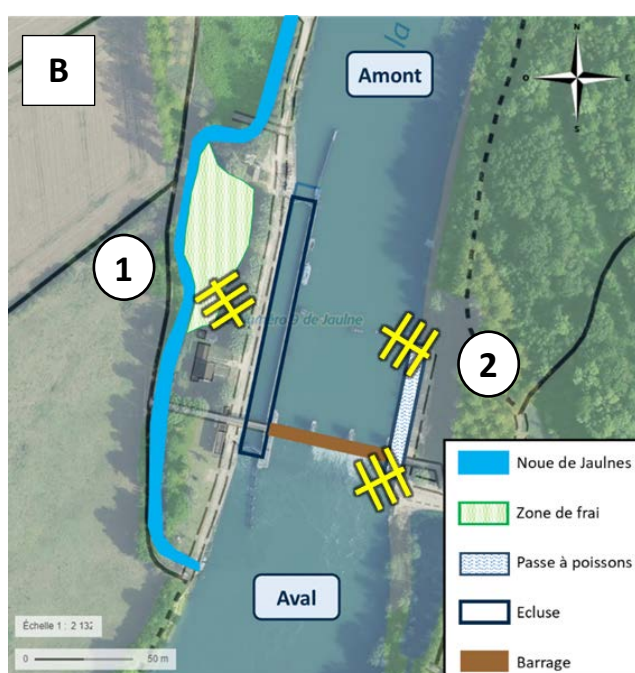
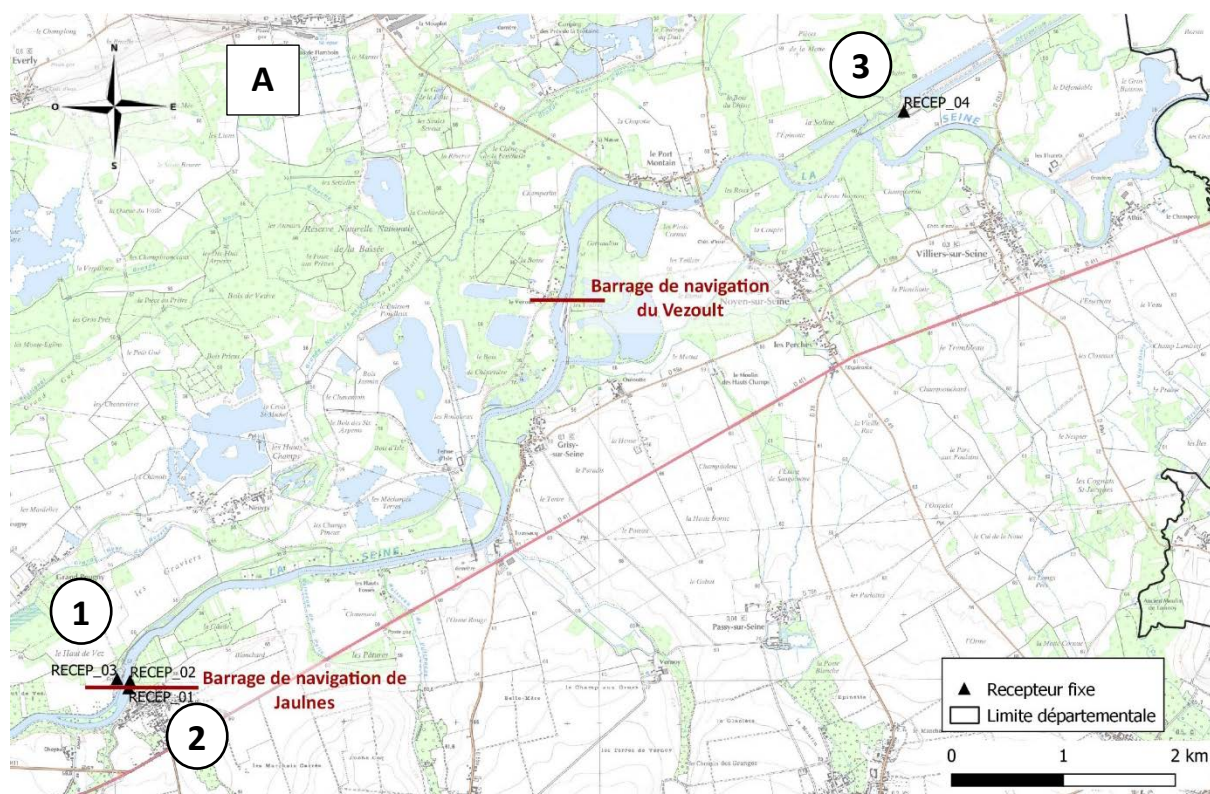
Orion Listener						
Date	Time	Site	Ant	Freq	Code	Power
2020-05-12	11:06:25	1	1	149,780	127	-95
2020-05-12	11:06:27	1	1	149,780	127	-99
2020-05-12	11:06:29	1	1	149,780	127	-94
2020-05-12	11:06:31	1	1	149,780	127	-89
2020-05-12	11:06:34	1	1	149,780	127	-89
2020-05-12	11:06:36	1	1	149,780	127	-80
2020-05-12	11:06:38	1	1	149,780	127	-79
2020-05-12	11:06:40	1	1	149,780	127	-78
2020-05-12	11:06:42	1	1	149,800	18	-108
2020-05-12	11:06:42	1	1	149,780	127	-79
2020-05-12	11:06:44	1	1	149,780	127	-80
2020-05-12	11:06:46	1	1	149,780	127	-82
2020-05-12	11:06:48	1	1	149,780	127	-84
2020-05-12	11:06:50	1	1	149,780	127	-82
2020-05-12	11:06:52	1	1	149,780	127	-79
2020-05-12	11:06:55	1	1	149,780	127	-75
2020-05-12	11:06:57	1	1	149,780	127	-75
2020-05-12	11:06:59	1	1	149,780	127	-75
2020-05-12	11:07:01	1	1	149,780	127	-74
2020-05-12	11:07:03	1	1	149,780	127	-79
2020-05-12	11:07:05	1	1	149,780	127	-84
2020-05-12	11:07:09	1	1	149,780	127	-93
2020-05-12	11:07:11	1	1	149,780	127	-96
2020-05-12	11:07:13	1	1	149,780	127	-98
2020-05-12	11:07:16	1	1	149,780	127	-98
2020-05-12	11:07:20	1	1	149,780	127	-101
2020-05-12	11:07:24	1	1	149,780	127	-101
2020-05-12	11:10:23	1	1	150,340	2	-108
2020-05-12	11:10:39	1	1	149,780	2	-107
2020-05-12	11:10:41	1	1	149,800	2	-108
2020-05-12	11:10:47	1	1	149,780	1	-108
2020-05-12	11:10:49	1	1	149,780	1	-107
2020-05-12	11:10:50	1	1	149,780	2	-107

Détection du brochet 127

Bruit

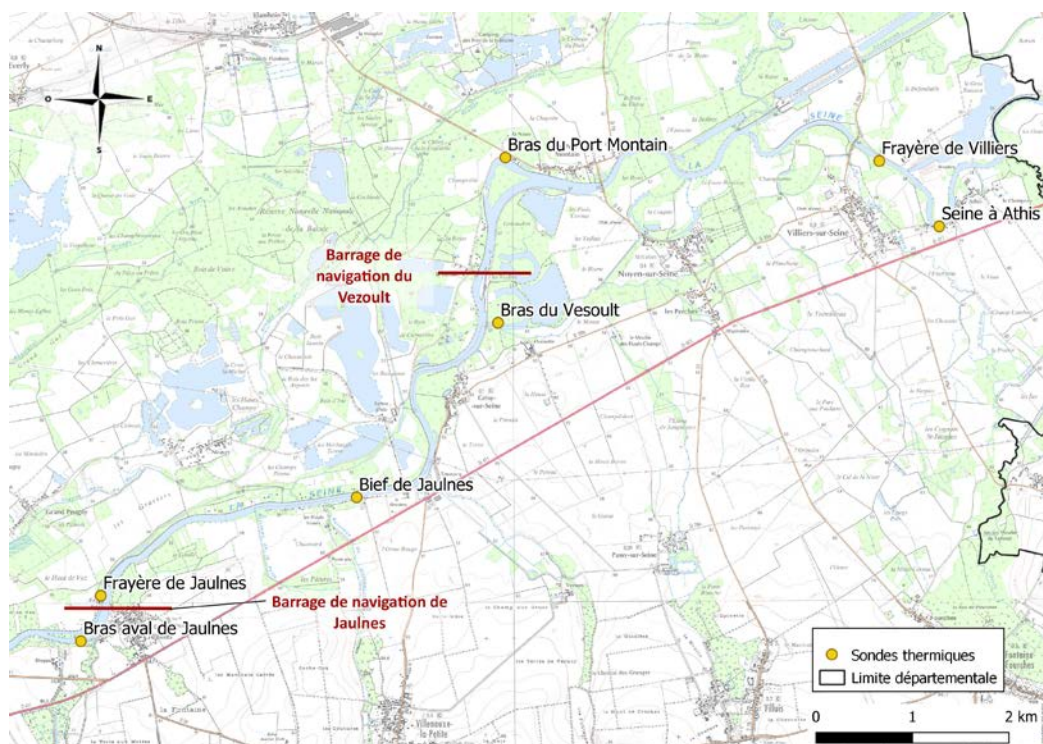
Annexe V : Capture d'écran de l'application Orion Listener® sur laquelle on peut voir les signaux émis par les émetteurs des brochets. Exemple ici de la détection de l'individu 127 identifiable par la continuité du signal du même code.

Annexe VI



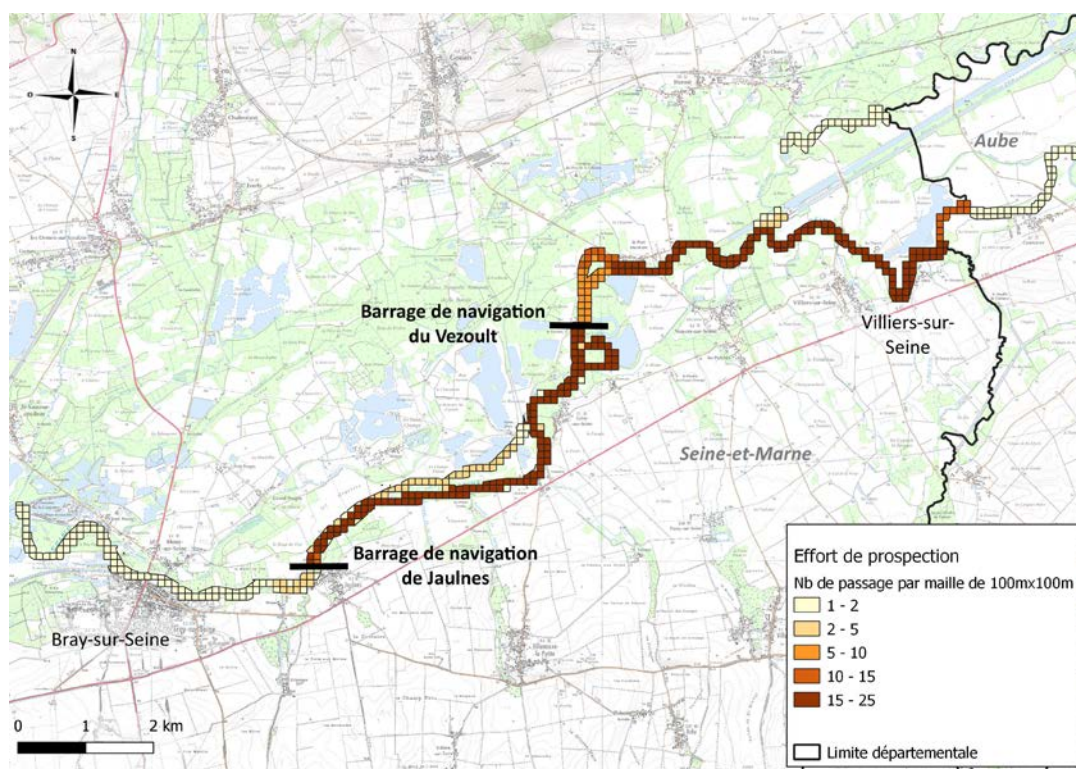
Annexe VI : (A) : localisation des postes fixes dans la zone d'étude. (B) : Emplacement des antennes au niveau de la frayère de Jaunes (1) et au niveau de la passe à poisson (2). (C): Emplacement de l'antenne à l'entrée du canal de Beaulieu.

Annexe VII



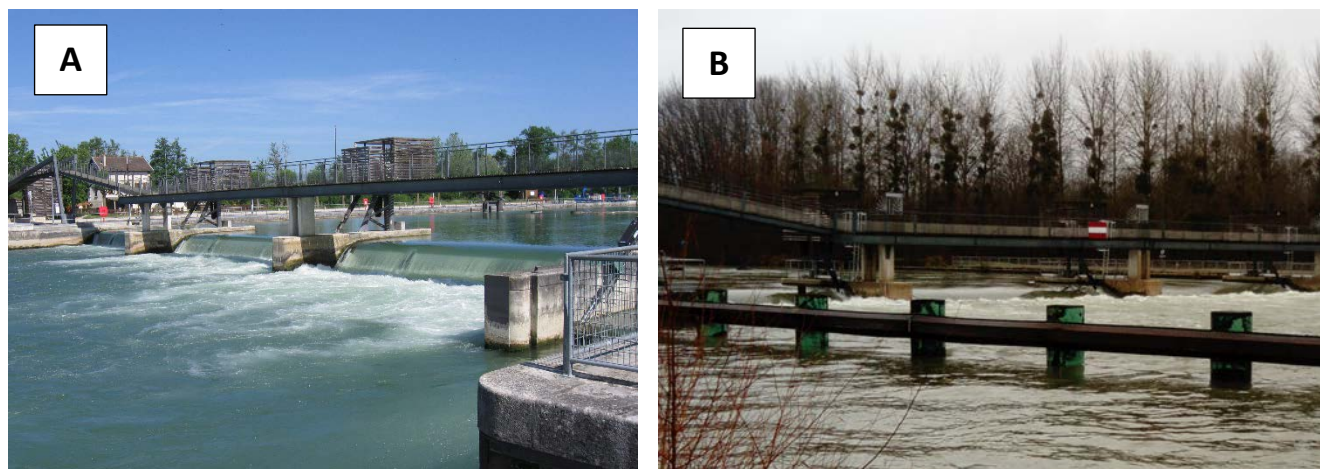
Annexe VII : Localisation des stations de suivi thermique dans la zone d'étude.

Annexe VIII



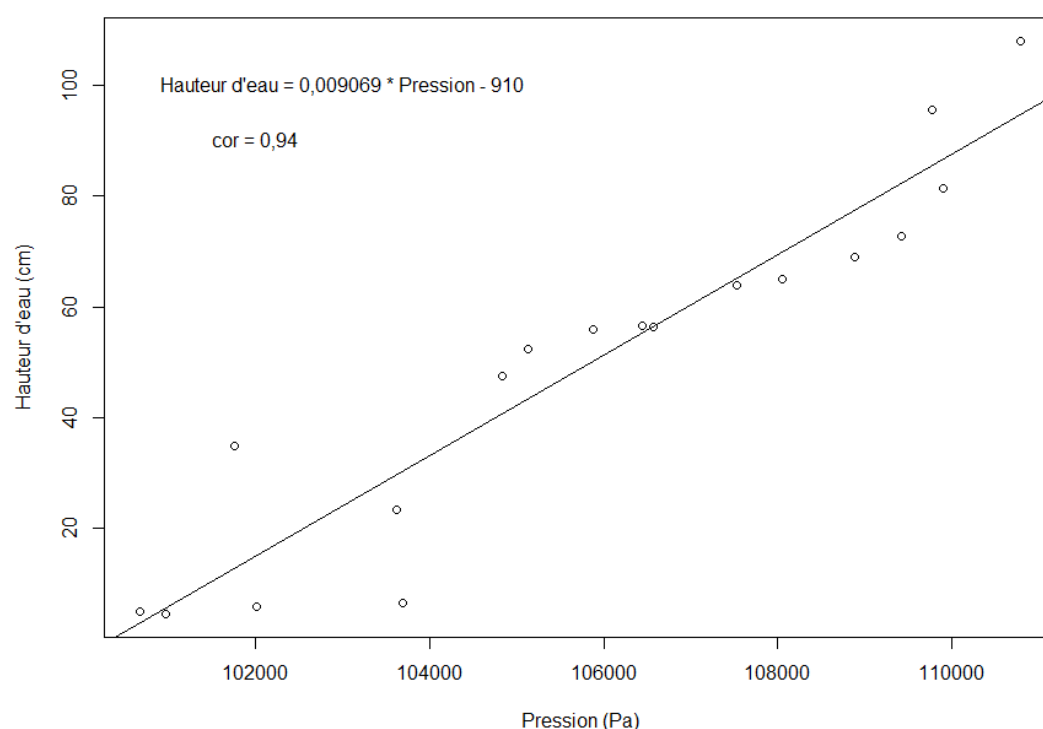
Annexe VIII : Effort de prospection réalisé pendant l'étude. Les zones les plus rouges correspondent aux secteurs les plus suivis.

Annexe IX



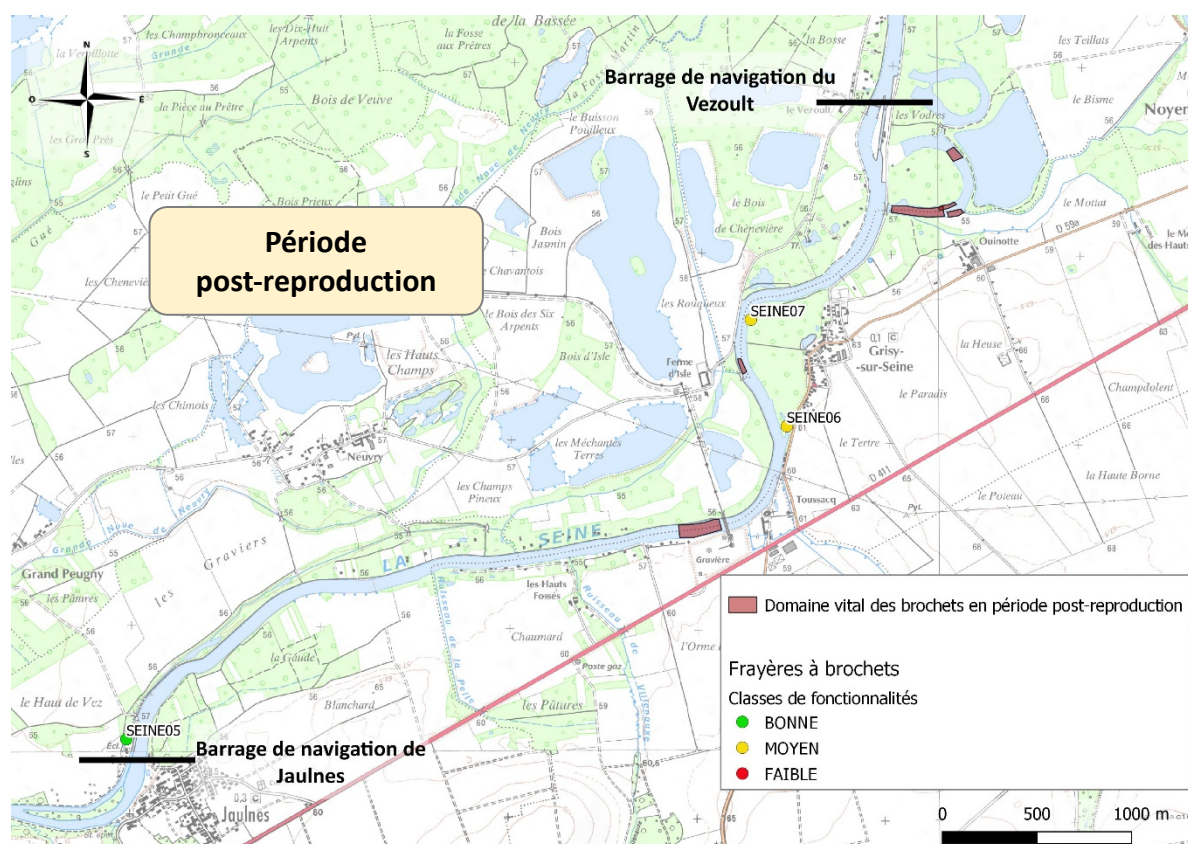
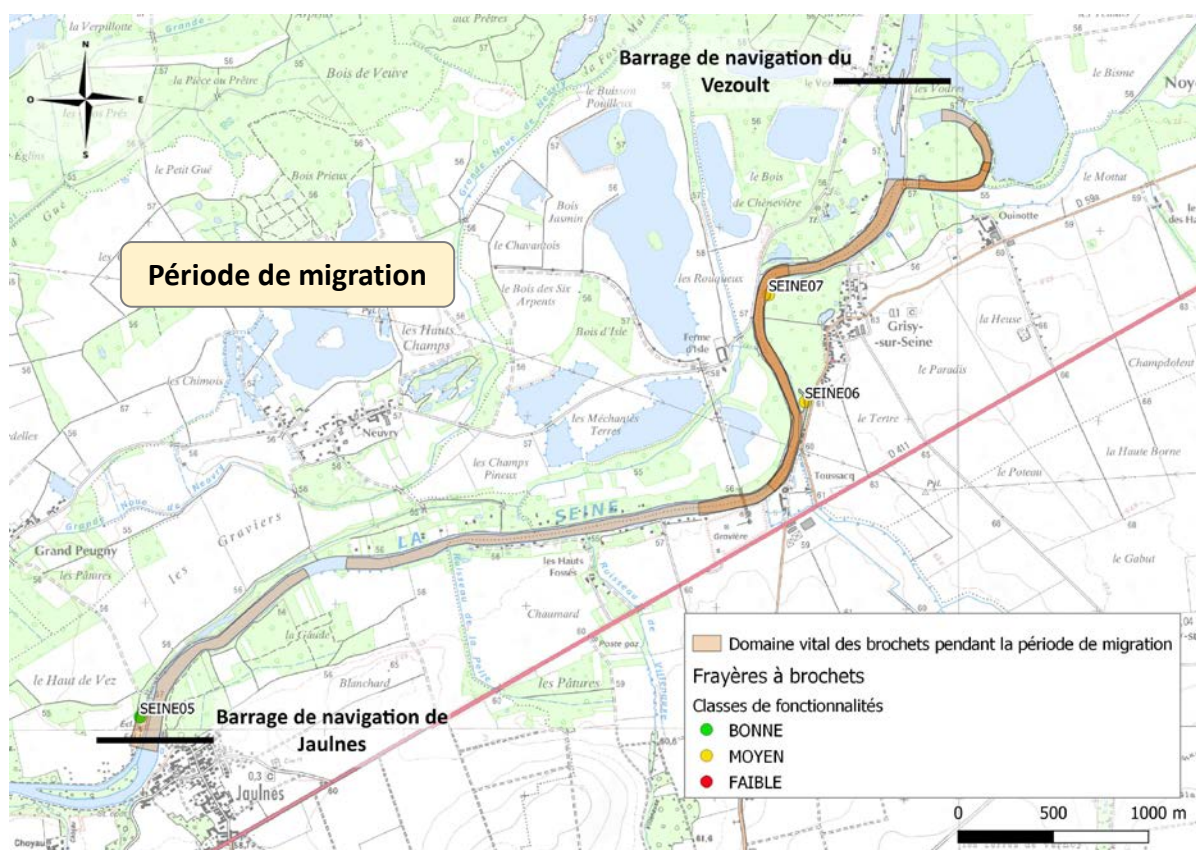
Annexe IX : Illustration de l'évolution de la hauteur du barrage de Jaulnes en fonction du débit de la Seine. (A): photo prise le 4 juin 2015 avec un débit de $39,20 \text{ m}^3/\text{s}$. (B) : Photo prise le 8 janvier 2020 avec un débit de $208 \text{ m}^3/\text{s}$. ©FDAAPPMA 77

Annexe X



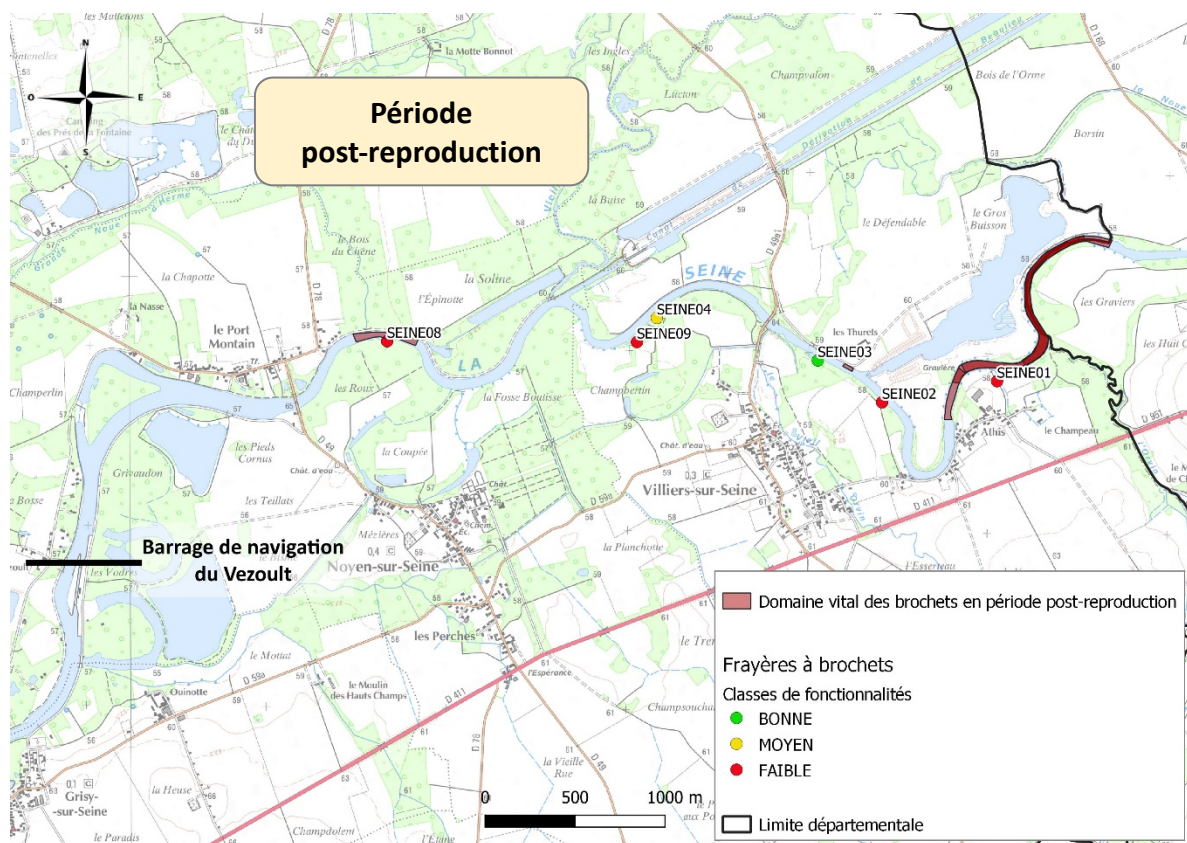
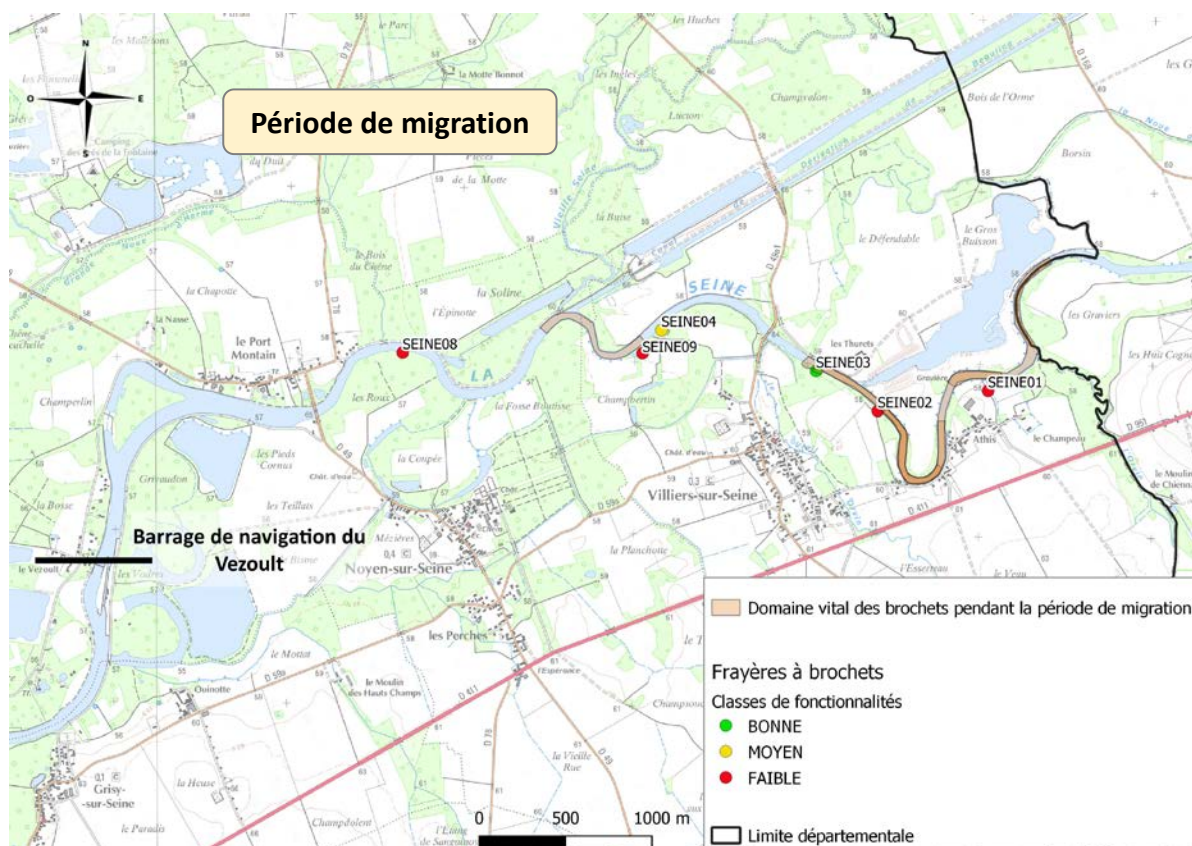
Annexe X : Régression linéaire entre la pression de l'eau enregistrée par les sondes dans les frayères de Jaulnes et de Villiers et de la hauteur d'eau relevée sur les mires.

Annexe XI



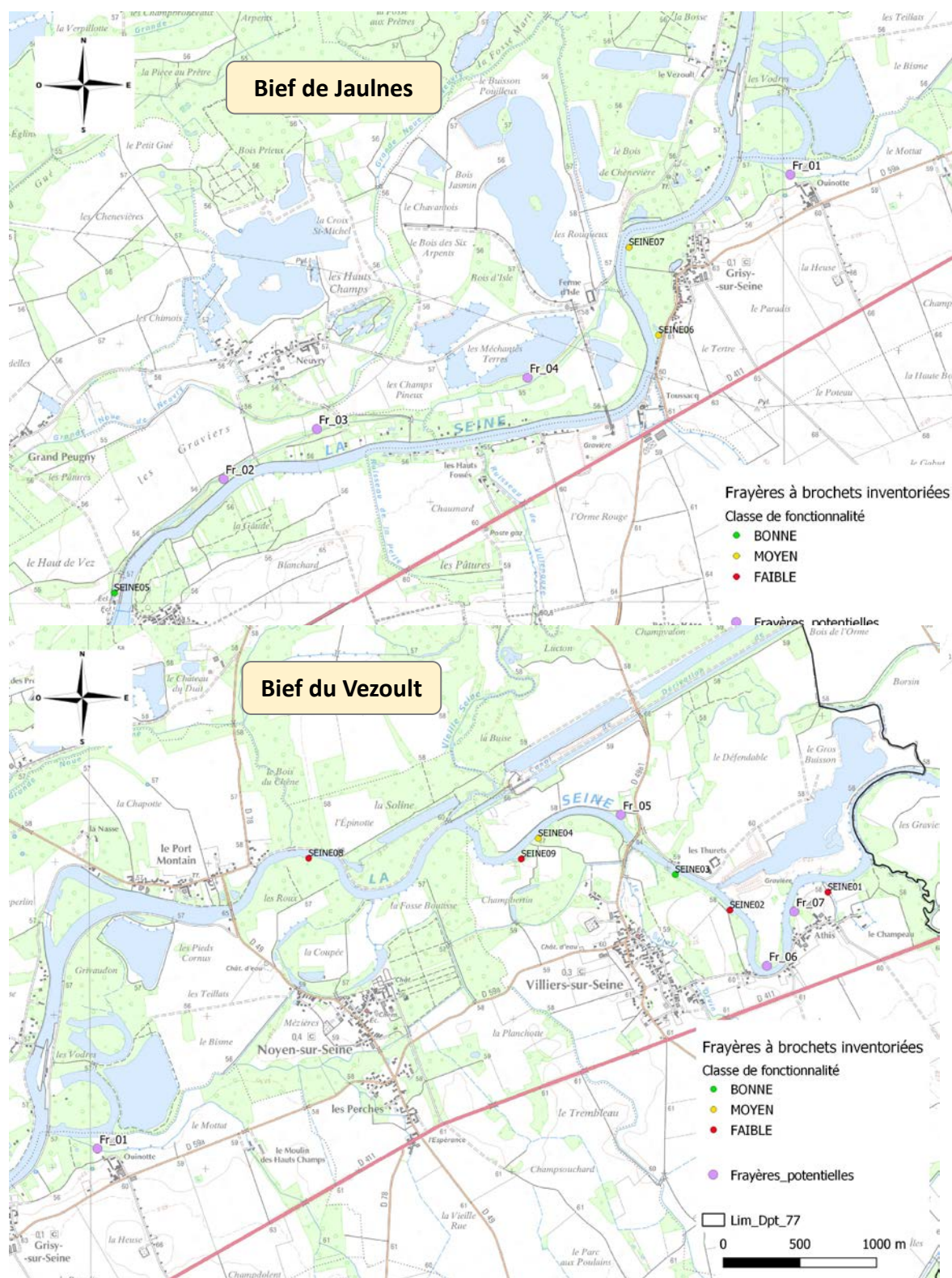
Annexe XI : Etendu du domaine vital des brochets marqués dans le bief de Jaulnes pendant la période de migration et la période post-reproduction.

Annexe XII



Annexe XII : Etendu du domaine vital des brochets marqués dans le **bief du Vezoult** pendant la période de migration et la période post-reproduction.

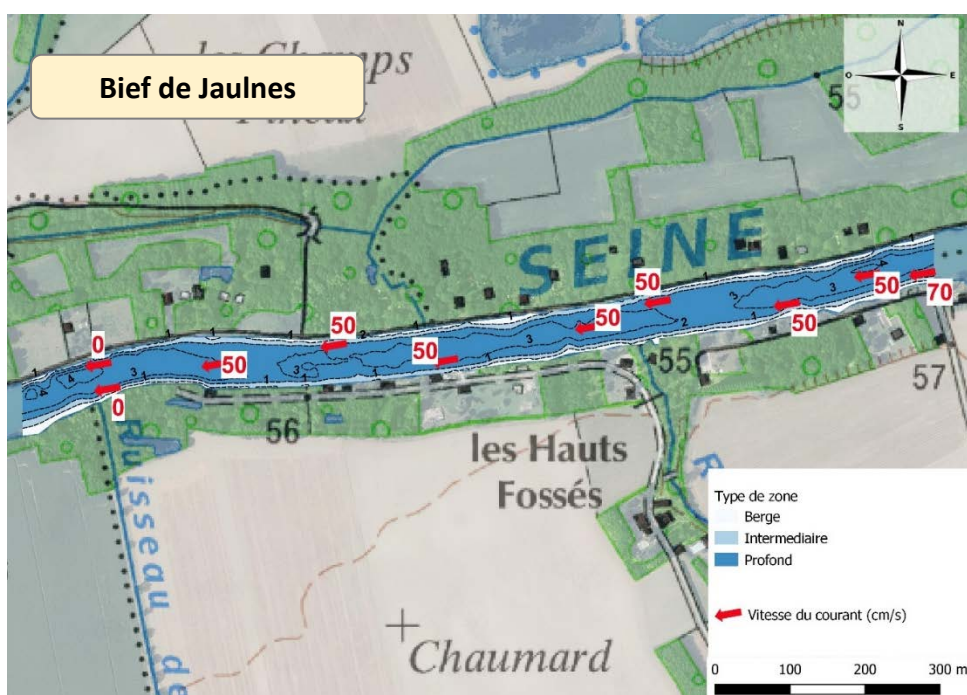
Annexe XIII



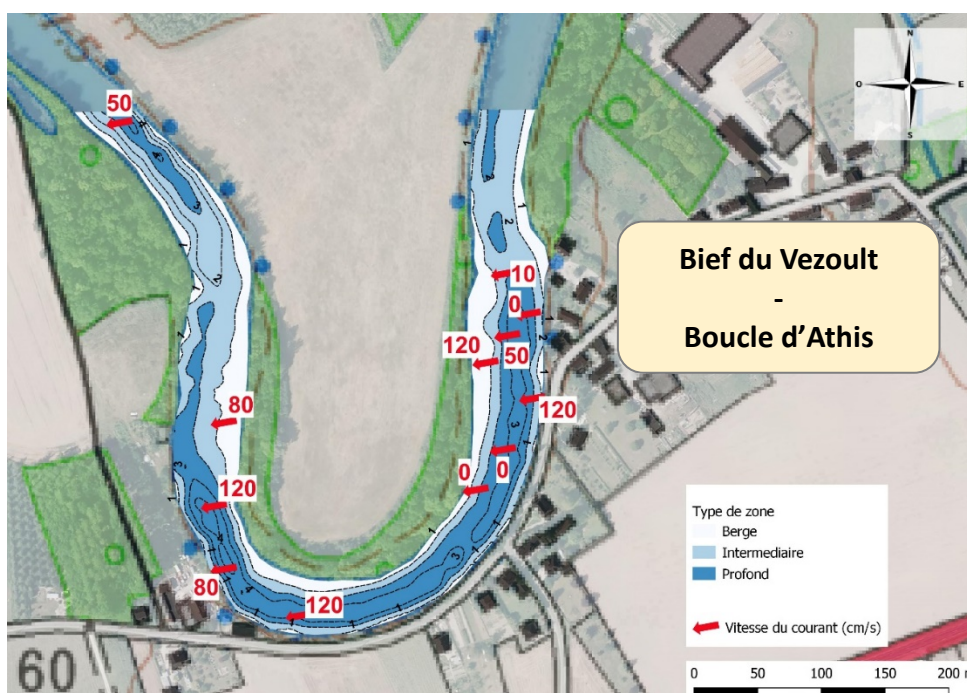
Annexe XIII: Localisation des frayères potentielles dans la zone d'étude et des frayères inventoriées lors de l'étude de 2016 (Houeix et al.).

Annexe XIV

A



B



C

Type de zone	Bief de Jaulnes	Boucle d'Athis
Berge	8 %	22 %
Intermédiaire	17 %	40 %
Profond	75 %	38 %

Annexe XIV : (A) : Résultats de la bathymétrie dans le bief de Jaulnes avec le type de faciès, les isobathes et les vitesses de courants en m/s. (B) : Résultats de la bathymétrie dans le bief du Vezoult au niveau de la boucle d'Athis qui n'est pas naviguée. Représentation des types de faciès, des isobathes et des vitesses de courants. (C) : Tableau résumant la proportion de chaque faciès dans chaque bief.

Annexe XV

Code_Emetteur	Espèce	Sexe	Taille (cm)	Poids (g)	Distance cumulée (km)	MDD Totale (km/j)	Domaine vital_période migration (km)	Domaine vital_post-reproduction (km)	Bief	Etat Sanitaire
1	Brochet	Femelle	104	7200	8,6	0,033	3,5	1,65	Vezoult	OK
31	Brochet	Femelle	63,4	1431	7,1	0,031	0,4	0,2	Vezoult	Lésion mandibule inférieure
44	Brochet	Femelle	72	2281	12,9	0,048	1,1	1,3	Vezoult	OK
53	Brochet	Femelle	63,3	1835	1,5	0,013	1		Vezoult	Erosion flanc gauche, érosion - marque
63	Brochet	Femelle	63,9	1563	11,2	0,047	3,1	0,3	Jaulnes	Lésion pédoncule caudal, érosion dessous
83	Brochet	Mâle	57,2	1471	12,9	0,049	1,4	4,7	Vezoult	RAS
89	Brochet	Femelle	50,1	952	0	0		0	Jaulnes	OK
98	Brochet	Mâle	60,5	1241	9	0,037	0,2	0	Jaulnes	RAS
116	Brochet	Mâle	51,3	809	3,3	0,013	1,6	0	Jaulnes	OK
127	Brochet	Femelle	56,3	1106	12,4	0,051	0,1	1,3	Jaulnes	Lésion opercule branchiale gauche, lésion
146	Brochet	Mâle	56,3	1017	8,9	0,062	4,9		Jaulnes	Lésion arrière opercule branchiale gauche
159	Brochet	Femelle	61,5	1515	6,6	0,024	2,8	0	Jaulnes	RAS
197	Brochet	Femelle	51,5	797	7,9	0,031	0	0	Jaulnes	Lésion mandibule inf. droite
212	Brochet	Mâle	56,4	1103	66,5	0,275	31,3	0,1	Jaulnes	Marque flanc gauche, érosion - marque flanc droit
					MOYENNE	12,06	0,051	3,954	0,796	

Annexe XV : Résultats des déplacements totaux des brochets marqués et retrouvés par radiopistage.

Annexe XVI

	Moyenne	Nb valeurs
Janv.	111,62	19
Fév.	131,36	21
Mars	124,04	21
Avril	92,99	21
Mai	77,01	21
Juin	54,98	20
Juil.	42,68	19
Août	44,47	19
Sept.	45,91	18
Oct.	55,05	19
Nov.	63,97	18
Déc.	80,04	18
Moy/Total	76,74	19,5

Annexe XVI : Débit mensuel interannuel et module interannuel calculé entre 1999 et 2020. La valeur rouge correspond au débit moyen maximum annuel et la valeur en vert correspond au débit moyen minimum annuel.

Données issues de la Banque Hydro (<http://hydro.eaufrance.fr/>) pour la station de Bazoches-lès-Bray (code. H1940020)

Annexe XVII

Fréquences théoriques	Débits (m3/s)	Intervalle de confiance 95%
Vicennale	413	[351 ; 591]
Décennale	364	[314 ; 503]
Quinquennale	312	[273 ; 413]
Biennale	235	[202 ; 286]

Annexe XVII : Débits de crues de débordement avec des fréquences de 2 ans, 5 ans, 10 ans et 20 ans. Données issues de la Banque Hydro (<http://hydro.eaufrance.fr/>) pour la station de Bazoches-lès-Bray (code. H1940020).